



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GESTÃO DE RISCOS E DESASTRES
NATURAIS NA AMAZÔNIA**

ELIVALDO CARVALHO ROCHA

**ÍNDICE INTEGRADO DE HIDROMETEOROLOGIA E VEGETAÇÃO (IIHV):
VALIDAÇÃO NA MESORREGIÃO HIDROGRÁFICA DO RIO MADEIRA**

**Belém - PA
2026**

ELIVALDO CARVALHO ROCHA

**ÍNDICE INTEGRADO DE HIDROMETEOROLOGIA E VEGETAÇÃO (IIHV):
VALIDAÇÃO NA MESORREGIÃO HIDROGRÁFICA DO RIO MADEIRA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Gestão de Riscos e Desastres Naturais na Amazônia do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre.

Área de concentração: Gestão de Riscos e Desastres Naturais na Amazônia

Linha de pesquisa: Ameaças Naturais no Ambiente Amazônico

Orientador: Prof. Dr. João de Athaydes Silva Junior

Coorientador: Prof. Dr. Everaldo Barreiros de Souza

Belém - PA

2026

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

- R672i Rocha, Elivaldo Carvalho.
Índice integrado de hidrometeorologia e vegetação (IIHV) :
validação na mesorregião hidrográfica do Rio Madeira / Elivaldo
Carvalho Rocha. — 2025.
115 f. + Produto Técnico-Tecnológico (5f.: il).

Orientador(a): Prof. Dr. João de Athaydes Silva Junior
Coorientador(a): Prof. Dr. Everaldo Barreiros de Souza

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará,
Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Gestão
de Risco e Desastre na Amazônia, Belém, 2025.

Acompanhado do Produto Técnico-Tecnológico “Plataforma de
Monitoramento IIHV (Google Earth Engine)“.

1. Sensoriamento Remoto. 2. Google Earth Engine. 3.
Eventos Hidrometeorológicos Extremos. 4. Índice Integrado
de Hidrometeorologia e Vegetação. 5. Monitoramento de
Secas e Cheias. I. Título. II. Título. “Plataforma de
Monitoramento IIHV (Google Earth Engine)“.

CDD 551.57

ELIVALDO CARVALHO ROCHA

**ÍNDICE INTEGRADO DE HIDROMETEOROLOGIA E VEGETAÇÃO (IIHV):
VALIDAÇÃO NA MESORREGIÃO HIDROGRÁFICA DO RIO MADEIRA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Gestão de Riscos e Desastres Naturais na Amazônia, do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Mestre em Gestão de Riscos e Desastres Naturais na Amazônia.

Área de concentração: Gestão de Riscos e Desastres Naturais na Amazônia

Linha de pesquisa: Ameaças Naturais no Ambiente Amazônico

Data de aprovação: 19/12/2025.

Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **JOAO DE ATHAYDES SILVA JUNIOR**
Data: 27/02/2026 15:43:29-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. João de Athaydes Silva Junior – Orientador
Doutor em Desenvolvimento Sustentável do Trópico Úmido
Universidade Federal do Pará

Documento assinado digitalmente
 **EVERALDO BARREIROS DE SOUZA**
Data: 26/02/2026 08:33:03-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Everaldo Barreiros de Souza – Coorientador
Doutor em Meteorologia
Universidade Federal do Pará

Documento assinado digitalmente
 **GIORDANI RAFAEL CONCEICAO SODRE**
Data: 26/02/2026 10:53:56-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Giordani Rafael Conceição Sodré – Examinador interno
Doutor em Ciências Ambientais
Universidade Federal do Pará

Documento assinado digitalmente
 **JOSE MARIA BRABO ALVES**
Data: 27/02/2026 10:55:30-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. José Maria Brabo Alves – Examinador externo
Doutor em Engenharia Civil (Recursos Hídricos)
Universidade Estadual do Ceará (UECE)

Documento assinado digitalmente
 **NAURINETE DE JESUS DA COSTA BARRETO**
Data: 27/02/2026 08:59:14-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Naurinete de Jesus da Costa Barreto – Examinador externo
Doutora em Ciências Climáticas
Instituto Tecnológico Vale (ITV)

*Este trabalho é dedicado ao meu filho João Julli
Soares Rocha e ao meu sobrinho Thales Henri-
que Pereira Rocha.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela vida, oportunidade e força concedidas para superar os desafios e concluir esta importante etapa da minha formação.

Um agradecimento especial à minha esposa, **Fernanda da Silva Soares**. Obrigado pelo seu amor incondicional, pela paciência infinita durante minhas longas horas de estudo e pelo apoio fundamental em cada momento desta jornada. Seu incentivo foi o alicerce que me permitiu persistir e realizar este trabalho. Esta conquista também é sua.

Ao meu orientador, **Prof. Dr. João de Athaydes Silva Junior**, expresso minha profunda gratidão. Agradeço pela confiança, pelo suporte técnico crucial, pelo incentivo constante e pela orientação segura ao longo de todo o projeto. Sua condução foi essencial para o meu crescimento como pesquisador.

Ao meu coorientador, **Prof. Dr. Everaldo Barreiros de Souza**, agradeço imensamente pelas contribuições valiosas, pela generosidade em compartilhar conhecimento e pelos insights fundamentais que elevaram a qualidade desta pesquisa.

Aos meus colegas e amigos da **turma PPGGRD 2024**, minha sincera gratidão. A troca de conhecimentos, o companheirismo diário e o apoio mútuo foram essenciais para tornar essa jornada acadêmica mais leve, enriquecedora e inspiradora. Juntos, compartilhamos desafios, aprendizados e conquistas que levaremos para a vida toda.

À Universidade Federal do Pará (UFPA) e ao Programa de Pós-Graduação em Gestão de Riscos e Desastres Naturais na Amazônia (PPGGRD), pela oportunidade e estrutura.

Por fim, registro a importância das ferramentas tecnológicas que viabilizaram a inovação proposta neste estudo: ao **Google Earth Engine (GEE)**, plataforma essencial que permitiu o processamento robusto dos dados de sensoriamento remoto, e ao **Streamlit**, tecnologia que possibilitou transformar análises complexas em uma aplicação interativa e acessível.

*"A ciência de hoje é a tecnologia de amanhã."
(Edward Teller)*

RESUMO

A Amazônia desempenha papel fundamental na estabilidade climática global através da reciclagem de umidade atmosférica, estocagem de carbono e regulação dos padrões de precipitação continental. Considerando o aumento na frequência e intensidade de eventos hidrometeorológicos extremos na região, este estudo desenvolveu e validou o Índice Integrado de Hidrometeorologia e Vegetação (IIHV) para a Mesorregião Hidrográfica do Rio Madeira, utilizando o Google Earth Engine (GEE). O IIHV surge como solução ao desafio enfrentado por gestores na interpretação simultânea de múltiplos índices ambientais, integrando indicadores meteorológicos (SPI_2 e $SPEI_3$) e de vegetação (EVI_P e $NDMI_P$) através da Matriz GUT (Gravidade, Urgência, Tendência), conforme a equação: $IIHV = [(G \times (EVI_P + NDMI_P) + (U \times SPI_2) + (T \times SPEI_3)) / ((2 \times G) + U + T)]$. A validação utilizou dois eventos extremos contrastantes: a cheia histórica de 2014, quando o Rio Madeira atingiu 19,74 metros em Porto Velho, e a seca severa de 2023, que registrou níveis mínimos históricos. O IIHV demonstrou eficácia ao capturar ambos os fenômenos, apresentando valores superiores a +2,0 durante a cheia e inferiores a -2,0 na seca, correlacionando-se significativamente com os impactos socioeconômicos e ambientais documentados. Como produto técnico, desenvolveu-se um aplicativo web no GEE que demonstra a aplicabilidade da metodologia, permitindo análise retrospectiva do IIHV para o período de 2003 a 2023 e evidenciando seu potencial para implementação em sistemas de monitoramento operacional. A ferramenta contribui para o fortalecimento da gestão de riscos e desastres naturais na Amazônia, alinhando-se aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável 6, 13 e 15.

Palavras-chave: sensoriamento remoto; Google Earth Engine; eventos hidrometeorológicos extremos; índice integrado de hidrometeorologia e vegetação; monitoramento de secas e cheias.

ABSTRACT

The Amazon plays a fundamental role in global climate stability through atmospheric moisture recycling, carbon storage, and regulation of continental precipitation patterns. Considering the increased frequency and intensity of extreme hydrometeorological events in the region, this study developed and validated the Integrated Hydrometeorology and Vegetation Index (IHVI) for the Madeira River Hydrographic Mesoregion, using Google Earth Engine (GEE). The IHVI emerges as a solution to the challenge faced by managers in simultaneously interpreting multiple environmental indices, integrating meteorological indicators (SPI_2 and $SPEI_3$) and vegetation indices (EVI_P and $NDMI_P$) through the GUT Matrix (Gravity, Urgency, Trend), according to the equation: $IHVI = [(G \times (EVI_P + NDMI_P) + (U \times SPI_2) + (T \times SPEI_3)) / ((2 \times G) + U + T)]$. Validation used two contrasting extreme events: the historic 2014 flood, when the Madeira River reached 19.74 meters in Porto Velho, and the severe 2023 drought, which recorded minimum historical levels. The IHVI demonstrated effectiveness in capturing both phenomena, presenting values above +2.0 during the flood and below -2.0 in the drought, correlating significantly with documented socioeconomic and environmental impacts. As a technical product, a web application was developed in GEE that demonstrates the methodology's applicability, allowing retrospective analysis of IHVI for the period 2003-2023 and highlighting its potential for implementation in operational monitoring systems. The tool contributes to strengthening risk and natural disaster management in the Amazon, aligning with Sustainable Development Goals 6, 13, and 15.

Keywords: remote sensing; Google Earth Engine; extreme hydrometeorological events; integrated hydrometeorology and vegetation index; drought and flood monitoring.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Mesorregiões Hidrográficas Amazônicas.....	23
Figura 2 – A Vasta e Complexa Macrorregião Hidrográfica Amazônica	24
Figura 3 – Distribuição de densidade de probabilidade e classes de severidade do SPI e SPEI.....	27
Figura 4 – Mesorregião Hidrográfica do Rio Madeira	30
Figura 5 – Identificação espacial dos municípios contidos na Mesorregião do Rio Madeira	32
Figura 6 – SPI ₂ : Março de 2014 na Mesorregião Hidrográfica do Rio Madeira.....	44
Figura 7 – SPEI ₃ : Março de 2014 na Mesorregião Hidrográfica do Rio Madeira	44
Figura 8 – EVI _p : Março de 2014 na Mesorregião Hidrográfica do Rio Madeira.....	45
Figura 9 – NDMI _p : Março de 2014 na Mesorregião Hidrográfica do Rio Madeira.....	46
Figura 10 – IIHV: Março de 2014 na Mesorregião Hidrográfica do Rio Madeira	47
Figura 11 – Março de 2014: Contagem por Tipo de Desastres	48
Figura 12 – Março de 2014: Os 10 Municípios Mais Afetados por Prejuízo Total	49
Figura 13 – Março de 2014: Prejuízo Público versus Privado	50
Figura 14 – Março de 2014: Distribuição de desastres por Dia	50
Figura 15 – Março de 2014: Composição dos Prejuízos Privados.....	51
Figura 16 – Março de 2014: Total de Unidades Afetadas	51
Figura 17 – Intensidade das Classes de IIHV em 2014	52
Figura 18 – SPI ₂ : Setembro de 2023 na Mesorregião Hidrográfica do Rio Madeira	54
Figura 19 – SPEI ₃ : Setembro de 2023 na Mesorregião Hidrográfica do Rio Madeira.....	55
Figura 20 – EVI _p : Setembro de 2023 na Mesorregião Hidrográfica do Rio Madeira.....	56
Figura 21 – NDMI _p : Setembro de 2023 na Mesorregião Hidrográfica do Rio Madeira.....	56
Figura 22 – IIHV: Setembro de 2023 na Mesorregião Hidrográfica do Rio Madeira.....	57
Figura 23 – Dezembro de 2023: Contagem por Tipo de Desastres	59
Figura 24 – Dezembro de 2023: Os 10 Municípios Mais Afetados por Prejuízo Total	59
Figura 25 – Dezembro de 2023: Prejuízo Público versus Privado	60
Figura 26 – Dezembro de 2023: Distribuição de desastres por Dia	60
Figura 27 – Dezembro de 2023: Composição dos Prejuízos Privados.....	61
Figura 28 – IIHV: Dezembro de 2023 na Mesorregião Hidrográfica do Rio Madeira	62
Figura 29 – Intensidade das Classes de IIHV em 2023	64
Figura 30 – IIHV: Março de 2014 - Matriz GUT de médio prazo: G1-U3-T2.....	65
Figura 31 – IIHV: Março de 2014 - Matriz GUT de médio prazo: G2-U3-T1.....	66
Figura 32 – IIHV: Março de 2014 - Matriz GUT de curto prazo: G3-U2-T1	66
Figura 33 – IIHV: Setembro de 2023 - Matriz GUT de médio prazo: G1-U3-T2.....	68
Figura 34 – IIHV: Setembro de 2023 - Matriz GUT de curto prazo: G3-U2-T1.....	69
Figura 35 – IIHV: Setembro de 2023 - Matriz GUT de médio prazo: G2-U3-T1.....	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Relação de municípios integrados à área de estudo.	33
Tabela 2 – Resumo da estrutura multidimensional do banco de dados S2ID processado.	35
Tabela 3 – Adaptação da Matriz GUT para o IIHV.....	37
Tabela 4 – Classes de severidade do Índice Integrado de Hidrometeorologia e Vegetação (IIHV).....	38
Tabela 5 – Quantificação das áreas por classe de severidade do IIHV em Março de 2014	47
Tabela 6 – Quantificação das áreas por classe de severidade do IIHV em Setembro de 2023	58
Tabela 7 – Quantificação das áreas por classe de severidade do IIHV em Dezembro de 2023.....	62
Tabela 8 – Comparação da área de "Umidade Extrema"em março de 2014 sob diferentes configurações da Matriz GUT.....	64
Tabela 9 – Comparação da área de "Seca Extrema"em setembro de 2023 sob diferentes configurações da Matriz GUT.....	67

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
ANADEM	Modelo Digital de Elevação Analítico
API	Interface de Programação de Aplicações (<i>Application Programming Interface</i>)
CHIRPS	<i>Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data</i>
CO ₂	Dióxido de Carbono
ENOS	El Niño-Oscilação Sul
ETP	Evapotranspiração Potencial
EVI	Índice de Vegetação Aprimorado (<i>Enhanced Vegetation Index</i>)
EVI _p	Anomalia Padronizada do Índice de Vegetação Aprimorado
FABDEM	<i>Forest And Buildings removed Copernicus DEM</i>
GEE	Google Earth Engine
GIS	Sistema de Informação Geográfica (<i>Geographic Information System</i>)
GMTED2010	<i>Global Multi-resolution Terrain Elevation Data 2010</i>
GPM	<i>Global Precipitation Measurement</i>
GPS	Sistema de Posicionamento Global (<i>Global Positioning System</i>)
GUT	Gravidade, Urgência e Tendência
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IG	Instituto de Geociências
IIHV	Índice Integrado de Hidrometeorologia e Vegetação
MCDA	Análise Multicritério (<i>Multicriteria Decision Analysis</i>)
MDR	Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional
MDT	Modelo Digital do Terreno

MODIS	<i>Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NCAR	<i>National Center for Atmospheric Research</i>
NDMI	Índice de Umidade por Diferença Normalizada (<i>Normalized Difference Moisture Index</i>)
NDMI _p	Anomalia Padronizada do Índice de Umidade por Diferença Normalizada
NDVI	Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>)
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
OMM	Organização Meteorológica Mundial
PPGGRD	Programa de Pós-Graduação em Gestão de Riscos e Desastres Naturais na Amazônia
RAISG	Rede Amazônica de Informação Socioambiental Georreferenciada
S2ID	Sistema Integrado de Informações sobre Desastres
SEDEC	Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil
SNIRH	Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos
SPEI	Índice Padronizado de Precipitação-Evapotranspiração (<i>Standardized Precipitation Evapotranspiration Index</i>)
SPEI ₃	Índice Padronizado de Precipitação-Evapotranspiração (escala de 3 meses)
SPI	Índice Padronizado de Precipitação (<i>Standardized Precipitation Index</i>)
SPI ₂	Índice Padronizado de Precipitação (escala de 2 meses)
SSD	Sistema de Suporte à Decisão
SWIR	Infravermelho de Ondas Curtas (<i>Short-Wave Infrared</i>)
TSM	Temperatura da Superfície do Mar
UFPA	Universidade Federal do Pará
USGS	<i>United States Geological Survey</i>
VCI	Índice de Condição da Vegetação (<i>Vegetation Condition Index</i>)
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Contextualização	16
1.2	Problemática e justificativa	17
1.2.1	Cheia de 2014.....	17
1.2.2	Seca de 2023	18
1.2.3	Limitações do Monitoramento Atual	18
1.2.4	Justificativa para o Desenvolvimento do IIHV	19
1.3	Objetivos	19
1.3.1	Objetivo Geral	19
1.3.2	Objetivos Específicos	19
1.4	Estrutura da dissertação.....	20
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	22
2.1	Dinâmica hidrometeorológica da Amazônia e teleconexões climáticas.....	22
2.2	Sensoriamento remoto como ferramenta de monitoramento	24
2.3	Índices de seca e umidade.....	25
2.3.1	Conceituação e Tipologia das Secas.....	25
2.3.2	Índices Meteorológicos: SPI e SPEI	26
2.3.3	Índices de Vegetação: NDVI, EVI, NDMI e VCI	27
2.4	Google Earth Engine: processamento em nuvem para análise geoespacial	28
2.5	A Matriz GUT como ferramenta de integração de índices.....	28
2.5.1	Origem e Conceito da Matriz GUT	28
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	30
3.1	Área de estudo: Mesorregião Hidrográfica do Rio Madeira	30
3.1.1	Dados Climáticos: TerraClimate.....	34
3.1.2	Dados de Vegetação: MODIS	34
3.1.3	Dados de Avaliação: S2ID	34
3.1.3.1	<i>Defasagem entre o registro administrativo e a data do fenômeno físico</i>	<i>35</i>
3.2	Desenvolvimento metodológico do IIHV	36
3.2.1	Cálculo e Padronização dos Índices Base.....	36
3.2.2	Adaptação da Matriz GUT para o Monitoramento Ambiental	37
3.2.3	Integração via Matriz GUT e Fórmula do IIHV	38
3.2.4	Classificação do IIHV	38
3.3	Implementação no Google Earth Engine	39
3.4	Métodos de validação	39

3.4.1	A analogia do corredor de rua para explicar o ganho informacional do IIHV	39
3.4.2	Procedimentos de Validação Histórica	40
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
4.1	Validação do IIHV na cheia histórica de 2014	42
4.1.1	Contexto do Evento	42
4.1.2	Comportamento dos Índices Componentes	43
4.1.3	Avaliação Conjunta com Registros de Desastres	48
4.1.4	Análise Quantitativa por Classe do IIHV em 2014	51
4.2	Validação do IIHV na seca extrema de 2023	53
4.2.1	Contexto do Evento	53
4.2.2	Comportamento dos Índices Componentes	53
4.2.3	Avaliação Conjunta com Registros de Desastres	58
4.2.4	Análise Quantitativa por Classe do IIHV	62
4.3	Análise de sensibilidade da Matriz GUT	64
4.3.1	Março de 2014	64
4.3.2	Setembro de 2023	67
4.4	Discussão dos resultados	70
5	PRODUTO TÉCNICO	72
5.1	Plataforma de desenvolvimento	72
5.2	Descrição e funcionalidades	72
5.3	Arquitetura e fontes de dados	74
5.4	Acesso e disponibilidade	74
5.5	Impacto e aplicabilidade	75
5.6	Alinhamento com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS)	75
6	CONCLUSÃO	77
6.1	Considerações finais	77
6.2	Perspectivas futuras	78
	REFERÊNCIAS	80
	APÊNDICE A – CÓDIGO FONTE DO APLICATIVO IIHV (GOO- GLE EARTH ENGINE)	83
	APÊNDICE B – PLATAFORMA DE MONITORAMENTO IIHV — PRODUTO TÉCNICO	111

1 INTRODUÇÃO

A gestão de recursos hídricos na Amazônia enfrenta desafios crescentes diante da intensificação de eventos hidrometeorológicos extremos. A complexidade dos sistemas naturais amazônicos, aliada à dificuldade de interpretação simultânea de múltiplos indicadores ambientais, tem limitado a capacidade de resposta dos órgãos gestores frente a secas e cheias cada vez mais severas. Neste contexto, o desenvolvimento de ferramentas integradas de monitoramento tornou-se uma necessidade premente para a região.

Esta dissertação apresenta o desenvolvimento, validação e implementação do Índice Integrado de Hidrometeorologia e Vegetação (IIHV), uma inovação metodológica que sintetiza múltiplas dimensões ambientais em um único indicador compreensível e coerente com a dinâmica hídrica e ecológica. Através da análise de dois eventos extremos emblemáticos - a cheia histórica de 2014 e a seca severa de 2023 na bacia do Rio Madeira - demonstra-se a eficácia do índice como ferramenta de apoio à decisão para gestão de riscos e desastres naturais na Amazônia.

1.1 Contextualização

A Amazônia representa um dos ecossistemas mais críticos para a estabilidade climática global. Com aproximadamente 5,5 milhões de quilômetros quadrados de floresta tropical, esta região desempenha papel fundamental na regulação hidrológica continental através da reciclagem de umidade atmosférica, processo que mantém os padrões de precipitação em grande parte da América do Sul. A floresta amazônica funciona como uma gigantesca “bomba biótica” (Makarieva; Gorshkov, 2007), reciclando cerca de 20 trilhões de litros de água diariamente através da evapotranspiração.

Este mecanismo de reciclagem de umidade é essencial não apenas para a própria bacia amazônica, mas para regiões localizadas a milhares de quilômetros de distância. Os “rios voadores” - massas de ar carregadas de umidade proveniente da floresta - transportam água atmosférica que garante as chuvas necessárias para a agricultura e o abastecimento hídrico do Centro-Sul do Brasil, norte da Argentina e Paraguai. Adicionalmente, a Amazônia armazena entre 150 a 200 bilhões de toneladas de carbono em sua biomassa e solos (Feldpausch *et al.*, 2012), quantidade equivalente a mais de uma década de emissões globais de CO₂.

No entanto, este sistema complexo e interdependente tem sido crescentemente afetado por perturbações naturais e antrópicas. Fenômenos climáticos de grande escala, como El Niño e La Niña, interação com mudanças locais no uso da terra, criando cenários de vulnerabilidade sem precedentes. O desmatamento acumulado, que já alcança cerca de 13% da floresta original, ameaça levar o sistema amazônico a um ponto de inflexão irreversível (Lovejoy; Nobre, 2018), com consequências catastróficas para o clima regional e global.

A Mesorregião Hidrográfica do Rio Madeira, área focal deste estudo, exemplifica os desafios contemporâneos da gestão hídrica amazônica. Como um dos principais tributários do Rio Amazonas, o Madeira drena uma área de aproximadamente 1,4 milhão de km², abrangendo territórios no Brasil, Bolívia e Peru. Sua importância transcende os aspectos hidrológicos, constituindo-se como eixo vital para o transporte, geração de energia e subsistência de milhões de pessoas.

1.2 Problemática e justificativa

A necessidade de ferramentas integradas de monitoramento para a Amazônia tornou-se dramaticamente evidente através de dois eventos extremos que impactaram severamente a região do Rio Madeira nos últimos anos. Estes eventos não apenas demonstraram a vulnerabilidade da região, mas também expuseram as limitações dos sistemas tradicionais de monitoramento e alerta.

1.2.1 Cheia de 2014

Em 2014, a bacia do Rio Madeira experimentou a maior inundação já registrada em sua história. O nível do rio em Porto Velho alcançou a marca sem precedentes de 19,74 metros, superando em mais de 3 metros a cota de alerta estabelecida em 16,68 metros. Este evento catastrófico resultou em impactos socioeconômicos devastadores:

- Mais de 60.000 pessoas foram diretamente afetadas, entre desabrigados e desalojados (Brasil. Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil – SEDEC, 2014)
- 1.781 famílias perderam suas casas completamente (Brasil, 2014),
- Comunidades ribeirinhas ficaram isoladas por períodos superiores a 4 meses (Espinoza *et al.*, 2014)
- Prejuízos econômicos diretos ultrapassaram R\$ 1,4 bilhão (Brasil, 2014),
- A BR-364, principal ligação rodoviária da região, permaneceu interditada por 37 dias (Brasil, 2014)
- Impactos transfronteiriços severos, com 80.000 pessoas afetadas na Bolívia (Espinoza *et al.*, 2014)
- Interrupção parcial da operação das usinas hidrelétricas de Santo Antônio e Jirau (Brasil, 2014)

1.2.2 Seca de 2023

Em contraste dramático, nove anos depois, registrou uma das secas mais severas da história amazônica. O Rio Madeira atingiu níveis historicamente baixos, com a régua de Porto Velho marcando apenas 1,10 metros em outubro - o menor valor em 56 anos de medições. As consequências foram igualmente devastadoras:

- Interrupção total da navegação comercial e de passageiros por mais de 90 dias (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico – ANA, 2023)
- 62 municípios amazonenses declararam situação de emergência (Brasil, 2023)
- Isolamento de 498 comunidades ribeirinhas, afetando 111.617 pessoas (Brasil, 2023)
- Mortandade massiva de fauna aquática, incluindo mais de 200 botos (Brasil, 2023)
- Desabastecimento generalizado de alimentos, combustível e medicamentos (Brasil, 2023)
- Comprometimento do abastecimento de água potável em áreas urbanas e rurais (Brasil, 2023)
- Redução de 45% na geração hidrelétrica, causando risco de racionamento energético (Brasil, 2023)

1.2.3 Limitações do Monitoramento Atual

A gestão destes eventos extremos revelou limitações críticas nos métodos tradicionais de monitoramento:

1. **Fragmentação de Indicadores:** Os sistemas atuais dependem de múltiplos índices isolados - meteorológicos (SPI, SPEI), hidrológicos (níveis fluviométricos) e de vegetação (NDVI, EVI) - cada qual com suas próprias escalas, metodologias e interpretações. Esta fragmentação dificulta uma visão integrada do sistema.
2. **Complexidade Interpretativa:** Gestores e equipes operacionais enfrentam o desafio de analisar simultaneamente 5 a 10 indicadores diferentes, muitas vezes com sinais contraditórios ou defasados temporalmente, tornando a tomada de decisão lenta e incerta.
3. **Defasagem Temporal:** Diferentes componentes do sistema respondem em escalas temporais distintas - a vegetação pode levar semanas para mostrar estresse hídrico, enquanto níveis fluviométricos respondem em dias. Esta defasagem compromete a capacidade de

resposta antecipada e confundem os agentes levando a erros na interpretação e análises dos eventos.

4. **Ausência de Integração Sistêmica:** Não existe uma métrica unificada que capture simultaneamente as dimensões hidrometeorológicas e ecológicas, limitando a compreensão holística dos processos em curso

1.2.4 Justificativa para o Desenvolvimento do IIHV

Diante dessas limitações e da crescente frequência de eventos extremos, tornou-se imperativo o desenvolvimento de uma ferramenta que:

- Integre múltiplas dimensões ambientais em um único indicador interpretável
- Facilite a tomada de decisão em diferentes níveis gerenciais
- Permita o monitoramento contínuo e sistemático das condições ambientais
- Seja acessível através de plataformas tecnológicas modernas
- Apoie a gestão proativa de riscos, não apenas reativa

O Índice Integrado de Hidrometeorologia e Vegetação (IIHV) foi concebido para atender estas necessidades, representando um avanço significativo na capacidade de monitoramento e gestão de eventos extremos na Amazônia.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Validar e demonstrar a eficácia do Índice Integrado de Hidrometeorologia e Vegetação (IIHV) como ferramenta operacional para monitoramento e gestão de eventos hidrometeorológicos extremos na Mesorregião Hidrográfica do Rio Madeira, através da análise sistemática dos eventos de cheia de 2014 e seca de 2023.

1.3.2 Objetivos Específicos

1. Avaliar a capacidade do IIHV em caracterizar eventos de seca e excesso de precipitação.
2. Implementar a metodologia de cálculo da IIHV no Google Earth Engine (GEE), integrando variáveis climáticas e de vegetação, como SPI_2 , $SPEI_3$, EVI_P e $NDMI_P$, para quantificar a severidade das secas e cheias.
3. Analisar os registros de eventos climáticos extremos do Sistema Integrado de Informações sobre Desastres (S2ID), correlacionando os valores do IIHV com ocorrências documentadas de secas e inundações na Mesorregião Hidrográfica do Rio Madeira.

4. Ajustar e calibrar os parâmetros do IIHV (G, U e T) com base na comparação entre os valores do índice e os impactos registrados no S2ID, garantindo maior precisão na identificação e monitoramento de eventos hidrometeorológicos adversos.
5. Gerar mapas e gráficos interativos no GEE, permitindo a visualização espacial e temporal dos padrões de seca e umidade, facilitando a análise e a comunicação dos resultados para órgãos ambientais, gestores públicos e comunidade científica.
6. Fornecer suporte técnico para a gestão de recursos hídricos e mitigação de desastres, auxiliando na definição de estratégias de adaptação e resposta a eventos extremos na Mesorregião Hidrográfica do Rio Madeira.
7. Desenvolver a página de divulgação em servidor gratuito do aplicativo e divulgação para a sociedade.

1.4 Estrutura da dissertação

Esta dissertação está organizada em seis capítulos que conduzem o leitor desde a fundamentação teórica até as aplicações práticas e perspectivas futuras do IIHV.

O **tópico 2** - Fundamentação Teórica - apresenta os conceitos fundamentais que embasam esta pesquisa. Inicia-se com uma análise da dinâmica hidrometeorológica da Amazônia, explorando os processos de teleconexões climáticas e seus impactos regionais. Em seguida, aborda-se o sensoriamento remoto como ferramenta essencial para o monitoramento ambiental em larga escala, discutindo suas potencialidades e limitações. O capítulo prossegue com uma revisão crítica dos principais índices de seca utilizados globalmente, analisando suas vantagens e desvantagens no contexto amazônico. Por fim, apresenta-se o Google Earth Engine como plataforma revolucionária de processamento em nuvem, destacando sua capacidade de democratizar o acesso a dados geoespaciais e viabilizar análises complexas em escala continental.

O **tópico 3** - Materiais e Métodos - detalha os procedimentos metodológicos adotados na pesquisa. Primeiramente, caracteriza-se a área de estudo, apresentando as particularidades hidrológicas, climáticas e socioeconômicas da Mesorregião Hidrográfica do Rio Madeira. Em seguida, descrevem-se as fontes de dados utilizadas, incluindo produtos de sensoriamento remoto (MODIS/MOD13A3 para índices de vegetação), dados climáticos do TerraClimate (precipitação e evapotranspiração potencial de 1993 a 2023) e registros do S2ID para avaliação dos eventos extremos. O capítulo apresenta o desenvolvimento matemático completo do IIHV, demonstrando como a Matriz GUT foi adaptada para integrar índices meteorológicos (SPI_2 e $SPEI_3$) e índices de vegetação padronizados (EVI_P e $NDMI_P$). Detalha-se também o processamento das séries temporais de 30 anos para cálculo das anomalias padronizadas e a aplicação da distribuição Gama para os índices meteorológicos. Finaliza-se com os procedimentos de implementação computacional no Google Earth Engine,

incluindo a estrutura do código JavaScript, estratégias de otimização para processamento de grandes volumes de dados e o desenvolvimento da interface interativa do aplicativo web.

O **tópico 4** - Resultados e Discussão - constitui o núcleo analítico da dissertação. Está dividido em três seções principais: a primeira analisa detalhadamente a resposta do IIHV durante a cheia histórica de 2014, apresentando mapas mensais do IIHV classificado e seus componentes ($SPEI_3$ Gama, SPI_2 Gama, $NDMI_P$ e EVI_P), com sobreposição espacial dos registros de desastres do S2ID, permitindo avaliar a evolução temporal e espacial do evento e sua correlação com os impactos documentados. A segunda seção aplica a mesma metodologia para a seca extrema de 2023, demonstrando como o índice e seus componentes capturaram a progressão do evento ao longo dos meses, identificando as áreas mais críticas e validando os resultados através da coincidência espacial com os registros oficiais de desastres. A terceira seção apresenta uma análise comparativa entre os dois eventos, evidenciando a robustez do IIHV em condições hidrometeorológicas opostas, demonstrando como as diferentes classes do índice (de Umidade Extrema a Seca Extrema) se distribuíram espacialmente em cada evento e estabelecendo a eficácia do índice como ferramenta operacional de monitoramento.

O **tópico 5** - Produto Técnico - descreve os produtos desenvolvidos para implementação e disseminação do IIHV. Apresenta-se primeiramente o aplicativo web desenvolvido no Google Earth Engine (<https://carvalhovaldo09.users.earthengine.app/view/iihv-ppggrd-ig-ufpa>), detalhando sua arquitetura, algoritmos de processamento e interface interativa que permite análises retrospectivas do período 2003-2023. O capítulo também documenta a página de documentação criada na plataforma Streamlit (<https://iihv-ppggrd-ig-ufpa.streamlit.app/>), que serve como portal de acesso e orientação para usuários, explicando a metodologia e interpretação dos resultados.

O **tópico 6** - Conclusão - sintetiza as principais contribuições da pesquisa, destacando como o IIHV representa um avanço metodológico significativo no monitoramento de eventos extremos na Amazônia. Discutem-se as limitações identificadas durante o desenvolvimento e validação do índice, incluindo questões relacionadas à disponibilidade de dados históricos e à calibração regional dos parâmetros. O capítulo apresenta recomendações práticas para a implementação institucional do IIHV, sugerindo protocolos de uso e integração com sistemas existentes. Finaliza-se com perspectivas futuras, propondo expansões do método para outras bacias amazônicas, aprimoramentos e potenciais aplicações em cenários de mudanças climáticas, consolidando assim a contribuição desta pesquisa para o avanço da gestão de riscos hidrometeorológicos na Amazônia e seu alinhamento com os esforços globais de adaptação climática e desenvolvimento sustentável presentes no Plano Ação Global de 2015 (Agenda 2030) da ONU.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

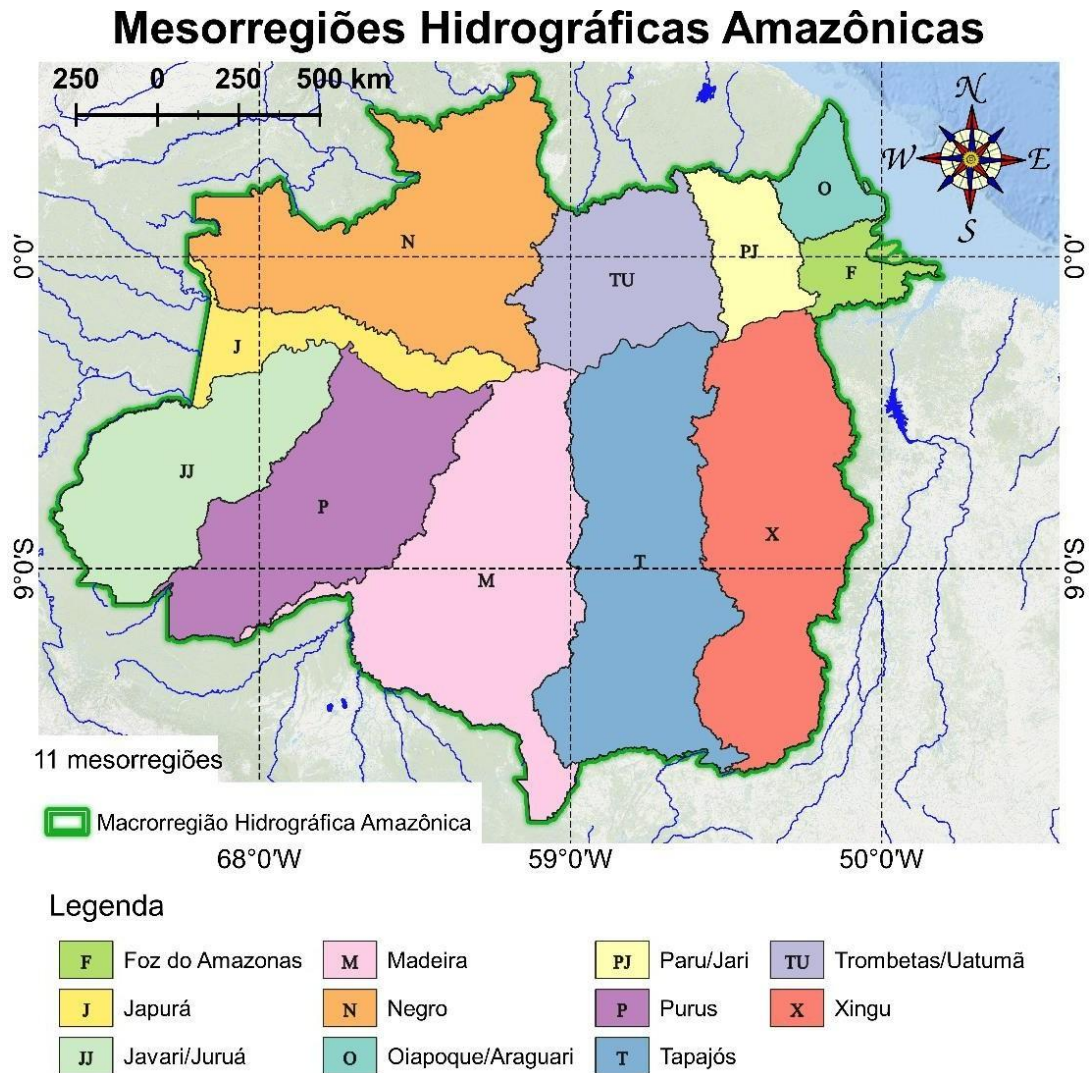
Este capítulo apresenta a revisão da literatura e o embasamento teórico que sustentam o desenvolvimento e a validação do Índice Integrado de Hidrometeorologia e Vegetação (IIHV). A abordagem multidisciplinar adotada nesta pesquisa exige a articulação de conceitos provenientes de diversas áreas do conhecimento, incluindo a climatologia da Amazônia, o sensoriamento remoto, a modelagem de índices ambientais e a ciência da computação em nuvem. A seguir, são detalhados os pilares conceituais desta dissertação, estabelecendo o contexto científico e tecnológico no qual o IIHV se insere.

2.1 Dinâmica hidrometeorológica da Amazônia e teleconexões climáticas

A Bacia Amazônica é um componente vital do sistema climático global, exercendo influência sobre os padrões de circulação atmosférica e o balanço hídrico em escala continental e até mesmo global. Sua vasta cobertura florestal, a maior floresta tropical do mundo, atua como uma gigantesca “bomba biótica” que recicla umidade, um processo fundamental para a manutenção do regime de chuvas em grande parte da América do Sul (Makarieva; Gorshkov, 2007). Através da evapotranspiração, a floresta libera enormes volumes de vapor d’água na atmosfera, que são transportados pelos ventos e formam os chamados “rios voadores”, responsáveis por irrigar regiões distantes, incluindo o Centro-Oeste e Sudeste do Brasil (Nobre; Sampaio; Salazar, 2007).

O clima da Amazônia, no entanto, não é determinado apenas por processos locais. Ele é fortemente modulado por fenômenos de teleconexão climática, que são padrões de circulação atmosférica de grande escala que conectam as condições climáticas de regiões geograficamente distantes (Wallace; Gutzler, 1981). Entre os mais influentes está o El Niño-Oscilação Sul (ENOS), um fenômeno acoplado oceano-atmosfera no Oceano Pacífico Equatorial. Durante os eventos de El Niño (fase quente do ENOS), o aquecimento anômalo das águas do Pacífico tende a deslocar as áreas de convecção atmosférica, resultando em uma redução significativa das chuvas sobre a maior parte da Amazônia, o que frequentemente leva a secas severas, como as observadas em 2005, 2010 e 2015/2016 (Marengo; Espinoza, 2016). Em contrapartida, os eventos de La Niña (fase fria) estão frequentemente associados a um aumento das chuvas e a eventos de cheias na região.

Figura 1 – Mesorregiões Hidrográficas Amazônicas



Fonte: Elaborado pelo autor.

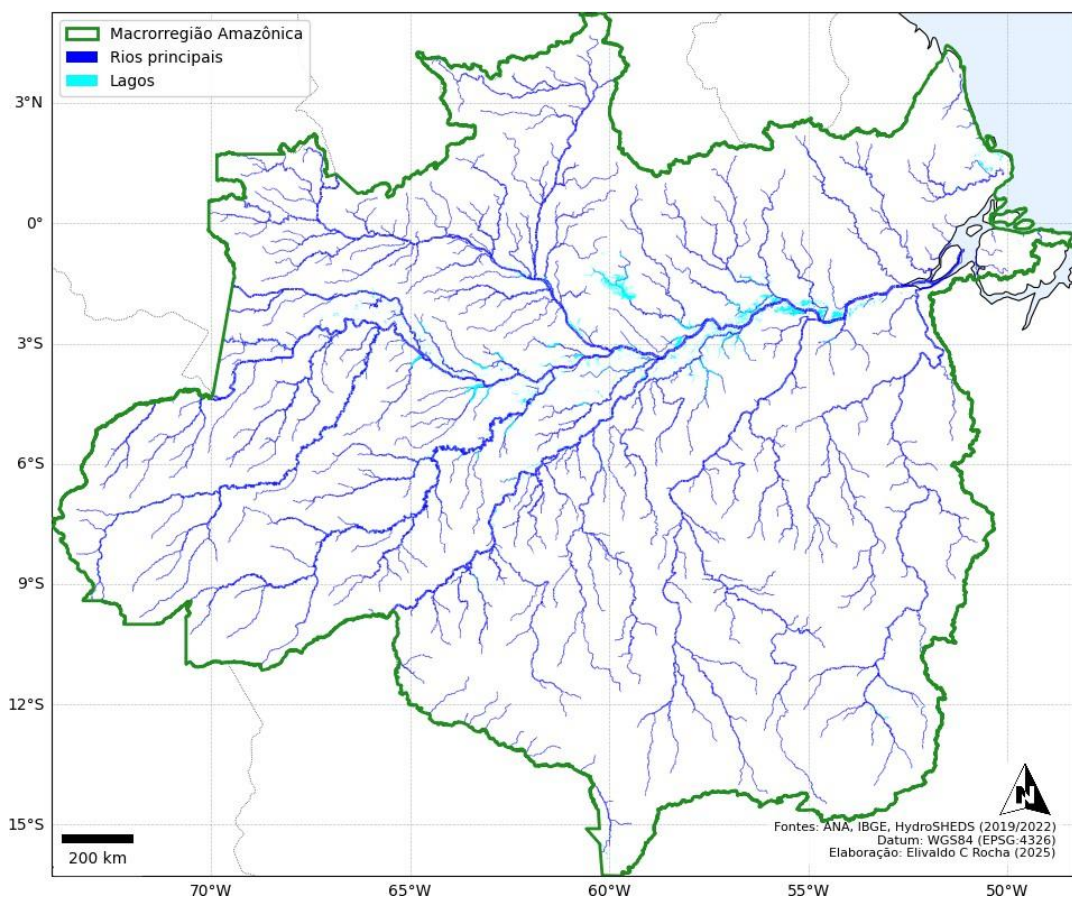
Além do ENOS, a variabilidade da Temperatura da Superfície do Mar (TSM) no Oceano Atlântico Tropical também desempenha um papel crucial. O gradiente de TSM entre o Atlântico Tropical Norte e o Atlântico Tropical Sul influencia a posição da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), principal sistema meteorológico responsável pelas chuvas na região durante o verão. Anomalias positivas de TSM no Atlântico Tropical Norte, por exemplo, podem deslocar a ZCIT para norte, causando secas no sul da Amazônia (Yoon; Zeng, 2010). A cheia recorde de 2014 na bacia do Rio Madeira, por exemplo, foi associada a um gradiente de TSM anômalo no Atlântico que favoreceu uma convecção intensa e persistente sobre o sudoeste da Amazônia (Espinoza *et al.*, 2014).

Contudo, este complexo sistema está sob crescente ameaça devido às atividades antrópicas, principalmente o desmatamento. A remoção da cobertura florestal reduz a evapotranspiração, enfraquece a reciclagem de umidade e pode levar a uma diminuição das chuvas e ao prolongamento da estação seca. Estudos alertam que a combinação sinérgica entre desmatamento,

mudanças climáticas e o aumento da frequência de incêndios pode empurrar o ecossistema amazônico para um “ponto de inflexão” (tipping point), a partir do qual grandes áreas da floresta poderiam ser irreversivelmente convertidas em um ecossistema mais seco, semelhante a uma savana (Lovejoy; Nobre, 2018). Alcançar este ponto teria consequências catastróficas não apenas para a biodiversidade e para os povos da região, mas também para a estabilidade climática de toda a América do Sul.

2.2 Sensoriamento remoto como ferramenta de monitoramento

Figura 2 – A Vasta e Complexa Macrorregião Hidrográfica Amazônica



Fonte: Elaborado pelo autor.

O monitoramento de um sistema tão vasto e complexo como a Amazônia seria impraticável sem o uso de tecnologias de sensoriamento remoto. O sensoriamento remoto consiste na aquisição de informações sobre um alvo ou fenômeno sem que haja contato físico com ele, utilizando sensores a bordo de satélites ou aeronaves para medir a radiação eletromagnética refletida ou emitida pela superfície terrestre (Jensen, 2017). Essa tecnologia oferece uma capacidade única de observar grandes áreas de forma sistemática, contínua e com uma frequência temporal que varia de dias a horas.

Para o monitoramento hidrometeorológico e da vegetação, os satélites fornecem dados essenciais que servem de base para a construção de índices e modelos. Produtos derivados de satélite permitem estimar a precipitação (como os dados do CHIRPS e GPM), a radiação solar, a temperatura da superfície e a evapotranspiração. Da mesma forma, a saúde e a densidade da vegetação podem ser avaliadas por meio de índices calculados a partir da resposta espectral da vegetação em diferentes comprimentos de onda.

2.3 Índices de seca e umidade

Para traduzir a imensa quantidade de dados brutos de sensoriamento remoto e de estações meteorológicas em informações úteis para a gestão de riscos, foram desenvolvidos os índices de seca. Segundo Zargar *et al.* (2011), um índice é uma medida quantitativa que caracteriza o nível de um fenômeno a partir da assimilação de uma ou mais variáveis em um único valor numérico. No contexto da gestão de recursos hídricos, os índices de seca facilitam a caracterização e o monitoramento de um fenômeno complexo e multifacetado.

2.3.1 Conceituação e Tipologia das Secas

A seca é um fenômeno climático caracterizado por um período prolongado de deficiência de precipitação ou desequilíbrio negativo no balanço hídrico, entendido como a diferença entre a precipitação e a evapotranspiração (Svoboda *et al.*, 2002). Diferentemente de outros fenômenos meteorológicos extremos, como furacões ou inundações, que se manifestam de forma abrupta, as secas desenvolvem-se lentamente e de maneira insidiosa, podendo persistir durante meses ou até anos. Sua atuação pode ser local ou regional, e seus impactos são significativos sobre o ambiente, a agricultura, os ecossistemas, os recursos hídricos e a qualidade de vida das populações.

A complexidade do fenômeno da seca levou ao desenvolvimento de uma tipologia que reconhece diferentes categorias, cada uma refletindo estágios distintos da propagação do déficit hídrico através do sistema hidrológico (Svoboda *et al.*, 2002). A **seca meteorológica** é a primeira manifestação do fenômeno, ocorrendo quando a quantidade de precipitação em uma região diminui significativamente durante um período relativamente curto, tipicamente de um mês. Este é o primeiro sinal de alerta de uma possível escassez de água e serve como base para o monitoramento precoce.

Caso a deficiência de precipitação persista, a seca evolui para a categoria **agrícola**, que se manifesta quando a falta de umidade no solo começa a afetar negativamente as culturas e a produção agrícola. Este tipo de seca geralmente se desenvolve após três a seis meses de déficit pluviométrico e é de particular importância para a segurança alimentar e a economia rural. A **seca hidrológica**, por sua vez, está relacionada aos efeitos de uma diminuição prolongada das chuvas sobre os recursos hídricos superficiais e subterrâneos, como rios, reservatórios artificiais e aquíferos. Esta categoria de seca, que tipicamente se estabelece após 12 meses ou mais de

déficit, tem implicações diretas para o abastecimento urbano, a geração de energia hidrelétrica e a navegação.

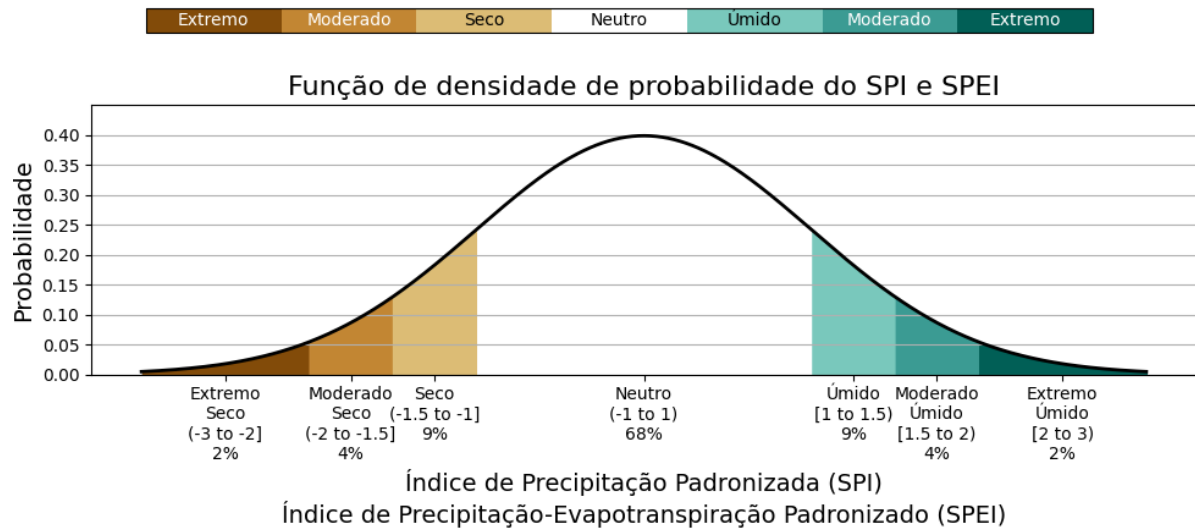
Finalmente, quando o déficit hídrico se prolonga por períodos superiores a 24 meses, observa-se a **seca econômica e social**, que se refere ao impacto da seca no sistema de abastecimento e nas condições de vida econômica e social das populações. Neste estágio, a procura de água excede a oferta disponível, resultando em crises humanitárias, migrações forçadas e colapso de sistemas produtivos.

Esta tipologia evidencia que as secas possuem um **efeito cumulativo no tempo**, atuam de forma espacialmente heterogênea com alto grau de variabilidade e intensidade dependendo do clima da região, e levam em consideração a ocorrência de desequilíbrio no balanço hídrico. Portanto, um índice de seca robusto e eficaz deve possuir três características essenciais: ser **cumulativo** (capaz de capturar a persistência temporal do fenômeno), **padronizado** (permitindo comparações espaciais independentemente do local, região ou clima), e **baseado no balanço hídrico** (para analisar o desequilíbrio entre a entrada de água pela precipitação e a saída pela evaporação e transpiração das plantas).

2.3.2 Índices Meteorológicos: SPI e SPEI

O **Índice Padronizado de Precipitação (SPI)**, desenvolvido por McKee, Doesken e Kleist (1993), é um dos índices de seca meteorológica mais utilizados no mundo e é recomendado pela Organização Meteorológica Mundial (OMM). O SPI quantifica o déficit ou excesso de precipitação para diferentes escalas de tempo (1, 3, 6, 12, 24 meses), ajustando os dados de precipitação acumulada a uma distribuição de probabilidade (geralmente a distribuição Gama) e, em seguida, transformando-a em uma distribuição normal com média zero e desvio padrão um. Valores negativos do SPI indicam condições de seca, enquanto valores positivos indicam condições de umidade. A principal vantagem do SPI é sua simplicidade, necessitando apenas de dados de precipitação, e sua capacidade de caracterizar a seca em diferentes escalas temporais. No entanto, em um cenário de aquecimento global, a temperatura e a evapotranspiração tornam-se variáveis cada vez mais importantes na modulação da disponibilidade hídrica. Para incorporar o efeito da temperatura, Vicente-Serrano, Beguería e López-Moreno (2010) desenvolveram o **Índice Padronizado de Precipitação-Evapotranspiração (SPEI)**. O SPEI segue uma metodologia de cálculo similar à do SPI, mas utiliza a série temporal do balanço hídrico climático (diferença entre a precipitação e a evapotranspiração potencial - ETP) em vez de apenas a precipitação. Ao considerar a ETP, o SPEI é mais sensível ao impacto do aumento das temperaturas na intensificação da seca, tornando-se uma ferramenta particularmente robusta para o monitoramento de secas em um clima em mudança.

Figura 3 – Distribuição de densidade de probabilidade e classes de severidade do SPI e SPEI



Elaborado por: Elivaldo Rocha

Fonte: Keyantash/NCAR (<https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/standardized-precipitation-index-spi>)

Fonte: Elaborado pelo autor.

2.3.3 Índices de Vegetação: NDVI, EVI, NDMI e VCI

Enquanto os índices meteorológicos medem as anomalias na atmosfera, os índices de vegetação, derivados de dados de satélite, avaliam a resposta do dossel vegetal às condições ambientais. O **Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI)** é o mais conhecido, calculado a partir da diferença entre a refletância do infravermelho próximo (NIR) e do vermelho (RED). O NDVI está diretamente relacionado à densidade de clorofila e à atividade fotossintética da vegetação. Contudo, em áreas de vegetação densa como a Amazônia, o NDVI pode saturar, perdendo a sensibilidade a variações na biomassa. Para corrigir essa limitação, foi desenvolvido o **Índice de Vegetação Aprimorado (EVI)**, que incorpora a banda do azul para reduzir as influências atmosféricas e do solo, sendo mais sensível a variações em florestas de alta biomassa (Huete *et al.*, 1997).

Outro índice relevante é o **Índice de Umidade por Diferença Normalizada (NDMI)**, que utiliza a banda do infravermelho de ondas curtas (SWIR) em vez do vermelho. O NDMI é sensível ao conteúdo de água na folhagem e na estrutura do dossel, sendo um excelente indicador de estresse hídrico na vegetação (Gao, 1996).

Para transformar esses índices de vegetação em indicadores de seca, Kogan (1995) propôs o **Índice de Condição da Vegetação (VCI)**. O VCI normaliza o valor do NDVI (ou outro índice de vegetação) de um determinado período em relação aos seus valores máximo e mínimo históricos para aquele mesmo período do ano. O resultado, expresso em uma escala de 0 a 100, remove a influência de fatores sazonais e geográficos, permitindo identificar o estresse na vegetação causado por condições climáticas adversas, como a seca.

2.4 Google Earth Engine: processamento em nuvem para análise geoespacial

O processamento e a análise de séries temporais longas de dados de satélite para grandes áreas, como as necessárias para o cálculo de índices de seca em escala continental, tradicionalmente exigiam supercomputadores e uma infraestrutura de armazenamento massiva. Essa barreira técnica foi superada com o advento de plataformas de computação em nuvem para análise geoespacial. O **Google Earth Engine (GEE)**, lançado em 2010, revolucionou o sensoriamento remoto ao combinar um catálogo de múltiplos petabytes de dados geoespaciais com uma plataforma de análise em escala planetária (Gorelick *et al.*, 2017).

O GEE permite que pesquisadores e gestores processem e analisem vastos conjuntos de dados de satélite (como Landsat, Sentinel, MODIS) e dados climáticos diretamente na nuvem, sem a necessidade de baixar os dados. Utilizando uma API em JavaScript ou Python, os usuários podem implementar algoritmos complexos e aplicá-los a décadas de dados históricos em questão de minutos. Essa capacidade de processamento paralelo massivo democratizou o acesso à análise de dados da Terra, viabilizando o desenvolvimento de sistemas de monitoramento ambiental operacional, como o proposto nesta dissertação.

2.5 A Matriz GUT como ferramenta de integração de índices

A complexidade do monitoramento de secas e cheias, especialmente em ecossistemas vastos e heterogêneos como a Amazônia, exige a análise simultânea de múltiplos indicadores que representam diferentes componentes do sistema ambiental. No entanto, a interpretação conjunta de diversos índices pode ser um desafio para gestores e tomadores de decisão. Para superar essa barreira, esta dissertação propõe uma abordagem inovadora: a adaptação da **Matriz GUT (Gravidade, Urgência e Tendência)**, tradicionalmente uma ferramenta de priorização de problemas, para servir como um framework de integração ponderada de índices ambientais.

2.5.1 Origem e Conceito da Matriz GUT

A Matriz GUT foi popularizada a partir dos trabalhos de Charles H. Kepner e Benjamin B. Tregoe em seu livro “The Rational Manager” (1965), que introduziu uma abordagem sistemática para a resolução de problemas e tomada de decisão (Kepner; Tregoe, 1965). A ferramenta foi concebida para auxiliar na priorização de problemas, permitindo que as organizações concentrem seus recursos nas questões mais críticas. A priorização é realizada através da atribuição de notas a três dimensões fundamentais:

- **Gravidade (G):** Refere-se ao impacto ou à profundidade dos efeitos do problema, caso ele venha a ocorrer. Avalia a intensidade dos danos e prejuízos potenciais sobre os processos, pessoas e resultados.

- **Urgência (U):** Relaciona-se com o tempo disponível para a tomada de ação. Um problema é mais urgente quanto menor for o prazo para uma intervenção eficaz, ou seja, quanto mais iminente for a necessidade de uma resposta.
- **Tendência (T):** Analisa o padrão de evolução do problema ao longo do tempo. Avalia se o problema tende a se agravar, permanecer estável ou regredir caso nenhuma ação seja tomada.

Tradicionalmente, cada dimensão recebe uma pontuação (geralmente de 1 a 5), e o produto ou a soma desses valores ($G \times U \times T$ ou $G + U + T$) resulta em um escore de prioridade. Problemas com escores mais altos são considerados mais críticos e devem ser tratados primeiro.

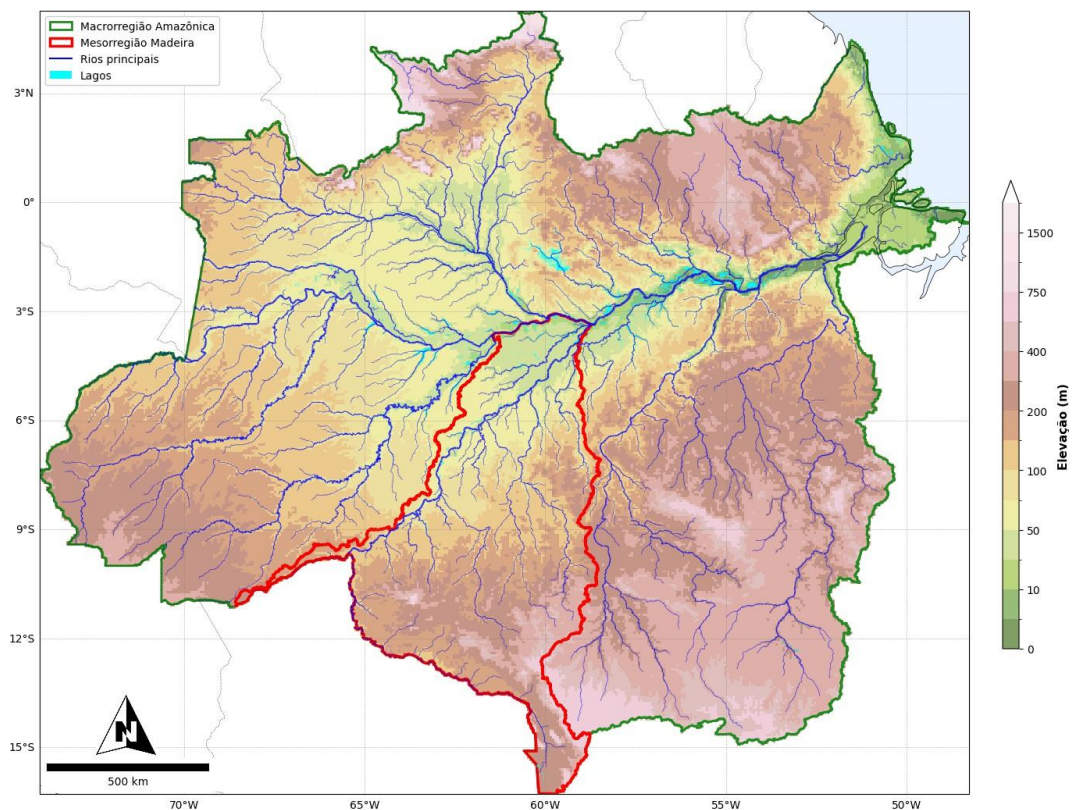
Diferente de modelos puramente biofísicos, a aplicação da Matriz GUT no IIHV fundamenta-se na Teoria da Decisão e em métodos de **Análise Multicritério (MCDA)**. O objetivo é promover a **interoperabilidade metodológica**, permitindo que o índice funcione como um **Sistema de Suporte à Decisão (SSD)**. Ao utilizar uma ferramenta já consagrada na administração e defesa civil (Kepner; Tregoe, 1965), o IIHV facilita o processo de **Human-in-the-loop**, onde o conhecimento do gestor é integrado ao processamento geoespacial.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo detalha os procedimentos metodológicos adotados para o desenvolvimento, implementação e validação do Índice Integrado de Hidrometeorologia e Vegetação (IIHV). A metodologia abrange a caracterização da área de estudo, a seleção e o pré-processamento dos dados, a formulação matemática do índice, a implementação computacional em ambiente de nuvem e os métodos de validação baseados em eventos extremos históricos.

3.1 Área de estudo: Mesorregião Hidrográfica do Rio Madeira

Figura 4 – Mesorregião Hidrográfica do Rio Madeira



Fontes: ANA, SNIRH, USGS (GMTED2010), HydroSHEDS.
Datum: WGS84. Elaboração: Elivaldo C Rocha (2025)

Fonte: Elaborado pelo autor.

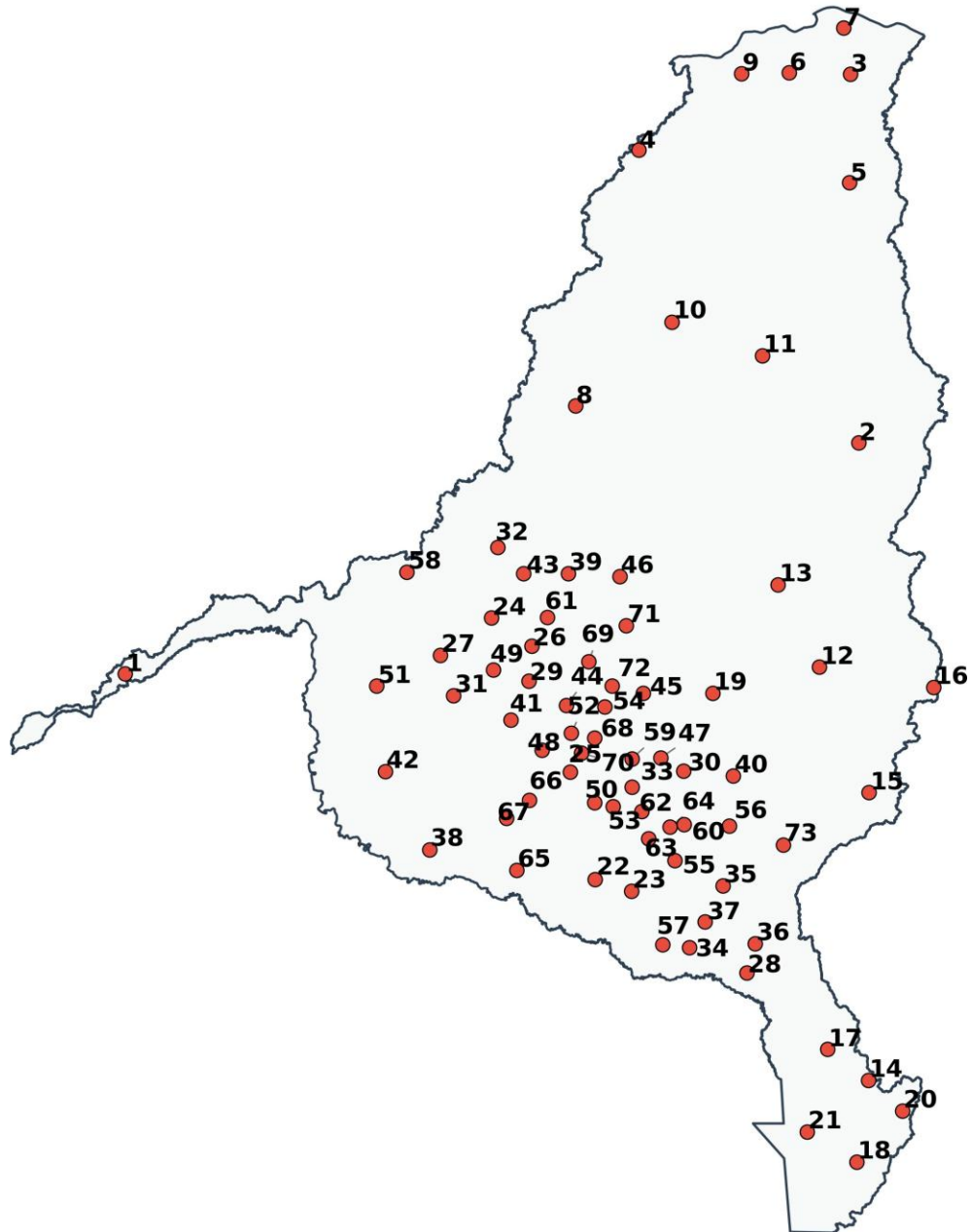
A área de estudo selecionada para o desenvolvimento e validação do IIHV é a Mesorregião Hidrográfica do Rio Madeira. Esta bacia, uma das mais importantes da Amazônia, é um sistema transfronteiriço que drena uma área de aproximadamente 1,4 milhão de km², abrangendo territórios no Brasil, Bolívia e Peru. O Rio Madeira é o principal tributário em volume de água do Rio Amazonas e desempenha um papel vital para a região, servindo como um eixo para

o transporte de mercadorias, a geração de energia hidrelétrica e a subsistência de milhões de pessoas.

A delimitação da área de estudo e a seleção das unidades municipais para a validação do IIHV seguiram critérios geográficos e hidrológicos rigorosos, visando assegurar a correlação física entre as anomalias detectadas e os impactos reportados. Utilizou-se como unidade espacial de referência a Mesorregião Hidrográfica do Rio Madeira, conforme delimitado pela ANA. Para a identificação dos municípios integrantes da análise, aplicou-se o método de interseção espacial do tipo ‘ponto em polígono’ (spatial join), no qual foram selecionados exclusivamente os municípios cujas sedes administrativas (identificadas por meio do código do município do IBGE e representadas pelas coordenadas geográficas inseridas no banco de dados do S2ID) encontram-se geograficamente contidas dentro dos limites poligonais da mesorregião hidrográfica. Este critério assegura que a validação do índice seja fundamentada apenas em registros de desastres ocorridos dentro do domínio hidrológico do Rio Madeira, totalizando 73 municípios validados (Figura 5 e Tabela 1). Tal abordagem elimina a subjetividade na inclusão de áreas e evita a contaminação da amostra com dados de municípios limítrofes cujos impactos não possuem relação direta com a dinâmica hídrica da bacia analisada.

Figura 5 – Identificação espacial dos municípios contidos na Mesorregião do Rio Madeira

**Identificação dos Municípios Contidos
na Mesorregião Hidrográfica do Rio Madeira**



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 1 – Relação de municípios integrados à área de estudo.

Município	UF	ID	Município	UF	ID
Plácido de Castro	AC	1	Costa Marques	RO	38
Apuí	AM	2	Cujubim	RO	39
Autazes	AM	3	Espigão D'Oeste	RO	40
Beruri	AM	4	Governador Jorge Teixeira	RO	41
Borba	AM	5	Guajará-Mirim	RO	42
Careiro	AM	6	Itapuã do Oeste	RO	43
Careiro da Várzea	AM	7	Jaru	RO	44
Humaitá	AM	8	Ji-Paraná	RO	45
Manaquiri	AM	9	Machadinho D'Oeste	RO	46
Manicoré	AM	10	Ministro Andreazza	RO	47
Novo Aripuanã	AM	11	Mirante da Serra	RO	48
Aripuanã	MT	12	Monte Negro	RO	49
Colniza	MT	13	Nova Brasilândia D'Oeste	RO	50
Conquista D'Oeste	MT	14	Nova Mamoré	RO	51
Juína	MT	15	Nova União	RO	52
Juruena	MT	16	Novo Horizonte do Oeste	RO	53
Nova Lacerda	MT	17	Ouro Preto do Oeste	RO	54
Pontes e Lacerda	MT	18	Parecis	RO	55
Rondolândia	MT	19	Pimenta Bueno	RO	56
Vale de São Domingos	MT	20	Pimenteiras do Oeste	RO	57
Vila Bela da Santíssima Trindade	MT	21	Porto Velho	RO	58
Alta Floresta D'Oeste	RO	22	Presidente Médici	RO	59
Alto Alegre dos Parecis	RO	23	Primavera de Rondônia	RO	60
Alto Paraíso	RO	24	Rio Crespo	RO	61
Alvorada D'Oeste	RO	25	Rolim de Moura	RO	62
Ariquemes	RO	26	Santa Luzia D'Oeste	RO	63
Buritis	RO	27	São Felipe D'Oeste	RO	64
Cabixi	RO	28	São Francisco do Guaporé	RO	65
Cacaulândia	RO	29	São Miguel do Guaporé	RO	66
Cacoal	RO	30	Seringueiras	RO	67
Campo Novo de Rondônia	RO	31	Teixeirópolis	RO	68
Candeias do Jamari	RO	32	Theobroma	RO	69
Castanheiras	RO	33	Urupá	RO	70
Cerejeiras	RO	34	Vale do Anari	RO	71
Chupinguaia	RO	35	Vale do Paraíso	RO	72
Colorado do Oeste	RO	36	Vilhena	RO	73
Corumbiara	RO	37			

Nota: Conforme identificação espacial apresentada na Figura 5.

3.1.1 Dados Climáticos: TerraClimate

Os dados de precipitação e evapotranspiração potencial (ETP) foram obtidos do dataset **TerraClimate** (Abatzoglou *et al.*, 2018). Trata-se de um conjunto de dados globais de alta resolução (~4 km) que abrange o período de 1958 até o presente, com atualização anual. O TerraClimate combina a alta resolução espacial do WorldClim com a resolução temporal de outros datasets, como o CRU Ts4.0, para criar séries temporais mensais de variáveis climáticas e de balanço hídrico. A utilização do TerraClimate é vantajosa por fornecer dados consistentes e espacialmente distribuídos para toda a bacia, superando a limitação da escassa rede de estações meteorológicas na Amazônia.

3.1.2 Dados de Vegetação: MODIS

Os índices de vegetação foram calculados a partir dos dados do sensor **MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)**, a bordo do satélite Terra. Utilizou-se o produto de Índices de Vegetação **MOD13A3 (Collection 6.1)**, que fornece dados mensais de NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), EVI (Enhanced Vegetation Index) e bandas de refletância de superfície com resolução espacial de 1 km (Didan, 2021). O produto MOD13A3 é gerado a partir de composições mensais, selecionando os melhores pixels disponíveis com base em critérios de qualidade, cobertura de nuvens e ângulo de visão. O EVI foi utilizado por ser mais sensível a variações em áreas de alta biomassa, como as florestas tropicais, em comparação com o NDVI, que tende a saturar em vegetação densa. O NDMI (Normalized Difference Moisture Index), um indicador de estresse hídrico na vegetação, foi calculado a partir das bandas do infravermelho próximo (NIR - sur_refl_b02) e do infravermelho de ondas curtas (SWIR - sur_refl_b07), também disponíveis no produto MOD13A3.

A integração de variáveis com diferentes janelas temporais (mensal para vegetação, bimestral para precipitação e trimestral para balanço hídrico) justifica-se pela natureza multiescalar dos desastres hidrometeorológicos na Amazônia. Metodologicamente, essa defasagem é harmonizada pela Matriz GUT, onde o SPI_2 fornece a Urgência (sinal de curto prazo), o $SPEI_3$ estabelece a Tendência (estabilidade do evento) e os índices de vegetação mensais determinam a Gravidade (impacto corrente). Essa arquitetura permite que o IIHV funcione como um sensor de espectro temporal amplo, capturando desde o início rápido de uma **flash drought** até a consolidação de uma cheia histórica.”

3.1.3 Dados de Avaliação: S2ID

Para a avaliação do desempenho do IIHV, utilizou-se a base de dados do **S2ID**, gerida pela Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil (SEDEC). Diferente de bases puramente tabulares, os dados originais foram geoprocessados pelo autor para permitir a análise espacial. Esta espacialização foi realizada através da integração

entre os registros do S2ID e a biblioteca geográfica *geobr* para Python (Pereira; Goncalves, 2019).

O procedimento consistiu em utilizar o código de município do IBGE (coluna CodIBGE) presente no S2ID como chave primária para extrair as coordenadas geográficas oficiais das sedes municipais disponíveis na base de dados do IBGE via *geobr*. Dessa forma, os dados foram convertidos para um formato vetorial de pontos (*geometry (Point)*), representando com precisão a localização administrativa dos eventos. A base final é multidimensional, contendo 71 atributos que detalham impactos humanos, materiais e prejuízos econômicos (Tabela 2).

Tabela 2 – Resumo da estrutura multidimensional do banco de dados S2ID processado.

Categoria	Descrição dos Atributos	Exemplos de Variáveis
Identificação e Localização	Dados geográficos e códigos administrativos oficiais.	<i>Protocolo, NomeMunic, UF, CodIBGE, geometry (Point)</i>
Temporalidade	Datas críticas para sincronização do fenômeno físico.	<i>DataReg, DataEvent</i>
Tipologia do Desastre	Classificação oficial conforme o CO-BRADE.	<i>CodCobrad, DescrTipo, GrupoDesa</i>
Danos Humanos (DH)	Contagem de indivíduos afetados diretamente.	<i>DHMortos, DHFetid, DHDesal, DHDesabr, DHTotal</i>
Danos Materiais (DM)	Quantificação de danos em infraestruturas e habitações.	<i>DMHabDan, DMSauDes, DMEnsDan, DMTotMat</i>
Prejuízos Econômicos (PE)	Impactos financeiros nos setores público e privado.	<i>PEPRAgri, PEPRPecu, PEPR-Tot</i>

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1.3.1 Defasagem entre o registro administrativo e a data do fenômeno físico

Um diferencial metodológico crucial nesta pesquisa foi o tratamento da variável temporal dos registros de desastres. Comumente, sistemas de informação apresentam uma defasagem entre o registro administrativo e o fenômeno físico. Para mitigar esse erro provocado por burocracias administrativas, a validação do IIHV utilizou exclusivamente a Data de Ocorrência do Evento (*DataEvent*) em detrimento da Data de Registro (*DataReg*).

A implementação técnica deste critério pode ser verificada no algoritmo de processamento desenvolvido em JavaScript para o Google Earth Engine (Apêndice A), onde o campo *DataEvent* foi convertido em um valor numérico para servir como o marcador cronológico oficial da feição (*system:time_start*):

```
// Conversão da data do evento para sincronização cronológica no GEE
// Criar corretamente `system:time_start` e `DataFormatada`
var S2ID_com_tempo = S2ID.map(function(feature) {
  var dataEpoch = ee.Number(feature.get("DataEvent"));
  var dataFormatada = ee.Date(feature.get("DataEvent")).
```

```

        format("YYYY-MM-dd");
    return feature.set({
        "system:time_start": dataEpoch,
        "DataFormatada": dataFormatada // Adiciona o novo atributo
    });
});

```

Essa abordagem garante o sincronismo cronológico necessário para que o estado da vegetação e o balanço hídrico analisados correspondam exatamente ao período em que o impacto foi sentido pela população local.

3.2 Desenvolvimento metodológico do IIHV

O desenvolvimento do IIHV partiu da necessidade de criar um indicador único que sintetizasse as múltiplas dimensões do sistema hidrológico e ecológico, superando a complexidade da análise simultânea de múltiplos índices. A metodologia foi estruturada em três etapas principais:

1. cálculo dos índices base e sua padronização;
2. integração ponderada através da Matriz GUT; e
3. classificação dos valores do índice.

3.2.1 Cálculo e Padronização dos Índices Base

Quatro índices base foram selecionados para compor o IIHV, representando as dimensões meteorológica e de vegetação:

1. **SPI-2 (Índice Padronizado de Precipitação - 2 meses):** Para capturar a seca meteorológica de curto prazo.
2. **SPEI-3 (Índice Padronizado de Precipitação-Evapotranspiração - 3 meses):** Para avaliar o balanço hídrico de curto a médio prazo, incorporando o efeito da temperatura.
3. **EVI-P (Anomalia Padronizada do EVI):** Para medir a resposta da saúde e do vigor da vegetação.
4. **NDMI-P (Anomalia Padronizada do NDMI):** Para avaliar o estresse hídrico na vegetação.

Os índices SPI e SPEI foram calculados seguindo as metodologias de McKee, Doesken e Kleist (1993) e Vicente-Serrano, Beguería e López-Moreno (2010), respectivamente. Para os índices de vegetação (EVI e NDMI), foi calculada a anomalia padronizada (ou Z-score) para cada mês, subtraindo-se a média histórica daquele mês e dividindo-se pelo desvio padrão histórico. Este processo de padronização (indicado pelo sufixo *P*) remove a sazonalidade e permite a comparação direta entre todos os índices, que passam a ter média zero e desvio padrão um.

3.2.2 Adaptação da Matriz GUT para o Monitoramento Ambiental

A principal inovação metodológica desta dissertação reside na adaptação conceitual da Matriz GUT. Em vez de ser utilizada para priorizar problemas distintos, ela é aqui empregada como um **framework para a integração ponderada de múltiplos índices quantitativos**, transformando-a de uma ferramenta de gestão em uma metodologia de modelagem ambiental. Cada dimensão da matriz foi associada a um componente específico do sistema hidrometeorológico e de vegetação, conforme descrito na tabela abaixo.

Tabela 3 – Adaptação da Matriz GUT para o IIHV

Dimensão GUT	Conceito Original (Priorização)	Adaptação para o IIHV (Integração)	Índices Associados
Gravidade (G) pesos de 1 a 3	Impacto do problema	Severidade das condições na vegetação	$EVI_P + NDMI_P$
Urgência (U) pesos de 1 a 3	Tempo para agir	Iminência de déficit hídrico de curto prazo	SPI_2
Tendência (T) pesos de 1 a 3	Evolução do problema	Evolução do balanço hídrico (clima)	$SPEI_3$

A flexibilidade na atribuição de pesos (G, U e T) permite que o IIHV seja ajustado conforme o nível de atuação do gestor público, seguindo a lógica de priorização de problemas proposta por Kepner e Tregoe (1965):

- **Nível Operacional (Foco em Urgência - U):** Prioriza o SPI_2 para respostas imediatas a eventos de início rápido.
- **Nível Tático (Foco em Gravidade - G):** Prioriza a resposta da vegetação ($EVI_P/NDMI_P$) para planejamento agrícola e de saúde.
- **Nível Estratégico (Foco em Tendência - T):** Prioriza o $SPEI_3$ para políticas de mitigação e análise de resiliência climática de longo prazo.

Nesta adaptação, a **Gravidade** deixa de ser uma avaliação subjetiva para ser representada pela resposta da vegetação, medida pelos índices EVI_P e $NDMI_P$, que quantificam o vigor e o estresse hídrico do dossel. A **Urgência** é associada às condições de precipitação de curto prazo (SPI_2), que indicam a necessidade imediata de água no sistema. Por fim, a **Tendência** é vinculada ao balanço hídrico de médio prazo ($SPEI_3$), que incorpora o efeito da temperatura e sinaliza a direção das mudanças climáticas.

Ao utilizar os próprios índices padronizados como pesos (ou como variáveis a serem ponderadas), o IIHV transforma um método qualitativo de priorização em um modelo quantitativo e dinâmico de integração. Esta abordagem permite sintetizar informações complexas de diferentes fontes de dados em um único indicador coeso e de fácil interpretação, o IIHV, cujo desenvolvimento e aplicação são detalhados no capítulo de Materiais e Métodos.

3.2.3 Integração via Matriz GUT e Fórmula do IIHV

A integração dos quatro índices padronizados foi realizada através de uma ponderação baseada na **Matriz GUT (Gravidade, Urgência e Tendência)**, uma ferramenta de priorização adaptada para este contexto (Kepner; Tregoe, 1965). A cada dimensão da matriz foi associado um ou mais índices:

- **Gravidade (G):** Representa o impacto e a severidade das condições na vegetação. Foi associada à soma dos índices de vegetação ($EVI_P + NDMI_P$).
- **Urgência (U):** Representa a iminência do problema, associada às condições de precipitação de curto prazo (SPI_2).
- **Tendência (T):** Representa a evolução do balanço hídrico, considerando a influência da temperatura ($SPEI_3$).

A fórmula final do IIHV foi definida como:

$$IIHV = \frac{(G \times (EVI_P + NDMI_P)) + (U \times SPI_2) + (T \times SPEI_3)}{(2 \times G) + U + T} \quad (3.1)$$

O denominador da equação (3.1) funciona como um fator de normalização, onde o peso da Gravidade (G) é multiplicado por dois, pois esta dimensão engloba dois índices (EVI e NDMI). Os pesos G, U e T podem ser ajustados pelo usuário, permitindo a adaptação do índice para diferentes focos de análise (operacional, tático ou estratégico).

3.2.4 Classificação do IIHV

Para facilitar a interpretação, os valores do IIHV foram categorizados em uma escala de classificação que varia de “Umidade Extrema” a “Seca Extrema”, baseada nos intervalos comumente utilizados para o SPI. Esta classificação permite uma rápida avaliação da condição hidrometeorológica e de vegetação da área analisada.

Tabela 4 – Classes de severidade do Índice Integrado de Hidrometeorologia e Vegetação (IIHV)

Classe	Intervalo do IIHV	Descrição
Umidade Extrema	$IIHV > 2,0$	Condições extremamente úmidas
Umidade Alta	$1,5 < IIHV \leq 2,0$	Condições úmidas acima do normal
Umidade Moderada	$1,0 < IIHV \leq 1,5$	Boas condições hídricas
Umidade Leve	$0,5 < IIHV \leq 1,0$	Sinais iniciais de umidade
Neutro	$-0,5 \leq IIHV \leq 0,5$	Condições normais
Seca Leve	$-1,0 \leq IIHV < -0,5$	Sinais iniciais de seca
Seca Moderada	$-1,5 \leq IIHV < -1,0$	Estresse hídrico moderado
Seca Severa	$-2,0 \leq IIHV < -1,5$	Impactos significativos
Seca Extrema	$IIHV < -2,0$	Condições críticas, perdas graves

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3 Implementação no Google Earth Engine

Toda a metodologia de cálculo e análise do IIHV foi implementada na plataforma **Google Earth Engine (GEE)** (Gorelick *et al.*, 2017). A escolha do GEE justifica-se por sua capacidade de processar em nuvem grandes volumes de dados geoespaciais de forma eficiente, seu vasto catálogo de datasets públicos e sua API flexível (em JavaScript e Python).

O fluxo de trabalho no GEE envolveu:

1. **Importação e filtragem** dos datasets TerraClimate e MODIS para a área de estudo e o período de análise (2003-2023).
2. **Criação de scripts** para o cálculo mensal dos quatro índices base (SPI_2 , $SPEI_3$, EVI e $NDMI$).
3. **Padronização** dos índices de vegetação para gerar o EVI_P e o $NDMI_P$.
4. **Aplicação da fórmula do IIHV** para gerar séries temporais e mapas mensais do índice integrado.
5. **Desenvolvimento de um aplicativo web** interativo como produto técnico da dissertação, permitindo a visualização de mapas, a geração de gráficos de séries temporais e a análise retrospectiva do IIHV para qualquer ponto dentro da bacia.

3.4 Métodos de validação

Em resposta à necessidade de avaliar o ganho informacional da métrica composta (IIHV) frente aos indicadores isolados, observa-se que o índice integrado atua como um **mecanismo de filtragem de concordância biofísica**. Enquanto o uso isolado do SPI_2 pode sinalizar anomalias meteorológicas transitórias que não necessariamente resultam em impactos socioeconômicos ou estresse ecológico imediato, o IIHV exige a **convergência de evidências entre o déficit hídrico e a resposta da vegetação** (EVI_P e $NDMI_P$) para classificar um evento como extremo. Dessa forma, o valor agregado do IIHV reside na redução de diagnósticos falsos e na maior precisão em identificar eventos de impacto real, **integrando a causa meteorológica à consequência biológica**, o que o torna uma ferramenta superior para a gestão de riscos em comparação ao monitoramento fragmentado de variáveis.

3.4.1 A analogia do corredor de rua para explicar o ganho informacional do IIHV

O monitoramento fragmentado de variáveis hidrometeorológicas e vegetacionais pode gerar “ruídos” interpretativos que dificultam a tomada de decisão. O valor agregado do IIHV reside na sua capacidade de filtrar essas inconsistências por meio do cruzamento multivariado, funcionando como um mecanismo de **convergência de evidências**. Para facilitar a compreensão da dinâmica entre as variáveis, pode-se utilizar a analogia de um corredor de rua em uma prova de resistência:

- **EVI_P (Saúde e Performance Biofísica):** Representa o estado geral de saúde e a capacidade de desempenho do corredor. Uma queda isolada no “verdor” da vegetação (EVI_P baixo) pode ser apenas um “cansaço” momentâneo (estresse biótico por pragas e doenças), uma interferência externa (desmatamento e queimadas) ou uma característica natural da estação (fenologia). Sem o respaldo de índices climáticos, diagnosticar uma seca apenas pelo EVI seria como afirmar que um corredor está em colapso hídrico apenas porque ele diminuiu o ritmo para respirar ou desviar de um obstáculo na pista.
- **$NDMI_P$ (Estresse Hídrico Foliar - A “Sede” da Planta):** Funciona como o sensor de sede do corredor. É a variável mais rápida e sensível. Contudo, um corredor pode sentir muita sede ($NDMI_P$ baixo) devido ao calor intenso, mas ainda estar bem de saúde e manter sua performance (EVI_P normal) se tiver acesso a reservas. Isoladamente, o $NDMI_P$ não diferencia uma desidratação passageira de um quadro clínico de insolação (desastre de seca).
- **SPI_2 (Disponibilidade Meteorológica Imediata):** Representa a água disponível na pista (ex: chuva que resfria o ambiente). Se parar de chover (SPI_2 baixo), o corredor sente o impacto térmico, mas na Amazônia, as árvores possuem “garrafas de água” (raízes profundas) que acessam o lençol freático. Diagnosticar seca apenas pelo SPI seria como dizer que o corredor vai desmaiar só porque não há água disponível no quilômetro atual da pista.
- **$SPEI_3$ (Memória do Balanço Hídrico - A “Reserva Estratégica”):** Representa o balanço entre o que o corredor bebe e o que ele perde pelo suor. É a **Reserva Hídrica** do sistema. Embora mais robusto que o SPI , o $SPEI$ ainda é um cálculo teórico. Ele indica que a “garrafa de água” está secando, mas só o cruzamento com a vegetação dirá se essa escassez realmente “quebrou” o desempenho do corredor.

Dessa forma, o IIHV reduz significativamente a incerteza e evita o erro de “falso positivo”. Na lógica do índice integrado, o desastre de Seca Severa ou Extrema só é confirmado quando há uma **concordância crítica**: a pista está seca (SPI_2), a reserva acabou ($SPEI_3$), o corredor sente sede extrema ($NDMI_P$) e, finalmente, sua saúde física entra em declínio (EVI_P). Este ganho informacional transforma dados fragmentados em um diagnóstico robusto para o suporte à decisão na Defesa Civil.

3.4.2 Procedimentos de Validação Histórica

A validação da eficácia do IIHV foi realizada através da análise de sua capacidade de representar corretamente eventos hidrometeorológicos extremos historicamente documentados. Foram selecionados dois eventos contrastantes e de grande magnitude na bacia do Rio Madeira:

1. **A Cheia Histórica de 2014:** O maior evento de inundação já registrado, quando o Rio Madeira atingiu a cota de 19,74 metros em Porto Velho. Para este evento, esperava-se que o IIHV apresentasse valores consistentemente altos e positivos (superiores a +2,0).
2. **A Seca Severa de 2023:** Uma das secas mais intensas da história, que levou o Rio Madeira a seu nível mais baixo em 56 anos (1,10 metros). Para este evento, esperava-se que o IIHV atingisse valores extremamente baixos e negativos (inferiores a -2,0).

A validação consistiu na comparação qualitativa e quantitativa entre as séries temporais do IIHV para os municípios afetados e os registros de impactos socioeconômicos e ambientais disponíveis no S2ID e em reportagens da mídia. Analisou-se a correlação entre a magnitude do índice e a severidade dos impactos documentados, avaliando a capacidade do IIHV de atuar como um indicador confiável da condição geral da bacia.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta os resultados da validação do Índice Integrado de Hidrometeorologia e Vegetação (IIHV) através da análise de dois eventos hidrometeorológicos extremos contrastantes ocorridos na Mesorregião Hidrográfica do Rio Madeira: a cheia histórica de 2014 e a seca extrema de 2023. A estrutura do capítulo foi organizada em três seções principais: a primeira dedica-se à análise do evento de cheia; a segunda, ao evento de seca; e a terceira apresenta uma síntese comparativa com outras configurações da Matriz GUT.

A análise fundamentou-se nos mapas mensais classificados do IIHV gerados e suas componentes pelo aplicativo desenvolvido no Google Earth Engine¹, os quais foram sobrepostos aos registros de desastres do S2ID. Os dados quantitativos de área por classe foram extraídos para cada mês dos dois anos analisados, permitindo uma avaliação sistemática da evolução espaço-temporal dos eventos.

Para a validação destes eventos históricos, adotou-se a Configuração **Base da Matriz GUT** definida pelos pesos **Gravidade=1, Urgência=2 e Tendência=3 (G1-U2-T3)**. Esta parametrização foi escolhida estrategicamente para priorizar as forçantes climáticas sobre a resposta da vegetação, seguindo a lógica da dinâmica ambiental amazônica:

1. **Tendência (Peso 3 - SPEI₃):** Atribuída ao componente de balanço hídrico climático, recebendo o peso máximo por incorporar a temperatura/evapotranspiração, variável determinante para a severidade dos eventos climáticos extremos atuais na região.
2. **Urgência (Peso 2 - SPI₂):** Atribuída à precipitação, atuando como o gatilho imediato do evento.
3. **Gravidade (Peso 1 - Vegetação):** Atribuída à resposta da biosfera. Recebeu o menor peso para evitar que a inércia biológica (a demora da floresta em responder à seca ou cheia) mascarasse os sinais de alerta precoce emitidos pela atmosfera.

Esta configuração (G1-U2-T3) busca, portanto, um índice sensível e antecipatório. Vale ressaltar que, ao final deste capítulo, será apresentada uma análise de sensibilidade, comparando esta configuração base com outros arranjos de pesos (G2-U3-T1, G1-U3-T2 e G3-U2-T1) para demonstrar a flexibilidade operacional do IIHV.

4.1 Validação do IIHV na cheia histórica de 2014

4.1.1 Contexto do Evento

O ano de 2014 foi marcado por um evento hidrológico excepcional na bacia do Rio Madeira. Em março daquele ano, o rio atingiu a cota de 19,74 metros na estação fluviométrica de Porto

¹ Aplicativo disponível em: <https://carvalhovaldo09.users.earthengine.app/view/iihv-ppggrd-ig-ufpa>

Velho, superando todos os registros históricos disponíveis desde 1967. Este evento resultou no deslocamento de milhares de famílias, interrupção de serviços essenciais e prejuízos econômicos estimados em centenas de milhões de reais, conforme documentado nos registros do S2ID.

A análise climatológica do período indicou a atuação de um padrão anômalo de circulação atmosférica que intensificou a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) sobre a região, resultando em precipitações muito acima da média histórica durante os meses de dezembro de 2013 a março de 2014. Este contexto ofereceu uma oportunidade singular para testar a capacidade do IIHV em representar condições de extrema umidade.

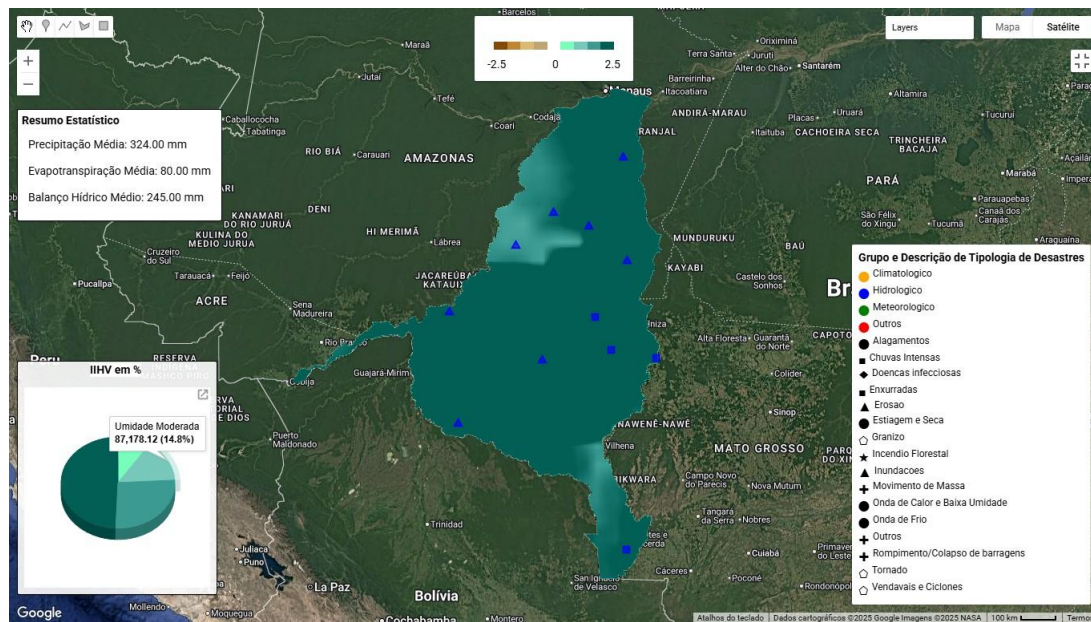
4.1.2 Comportamento dos Índices Componentes

A decomposição do IIHV em seus quatro índices constituintes durante o ápice da cheia, em março de 2014, permite uma compreensão detalhada da dinâmica acoplada atmosfera-biosfera multivariada. A análise espacial e estatística dos componentes revela padrões distintos entre as forçantes meteorológicas e a resposta da vegetação.

A análise detalha revela uma convergência hidrometeorológica absoluta, fenômeno distinto da heterogeneidade observada em outros eventos extremos. Neste caso, as forçantes atmosféricas atuaram em uníssono para saturar o sistema hidrológico da bacia.

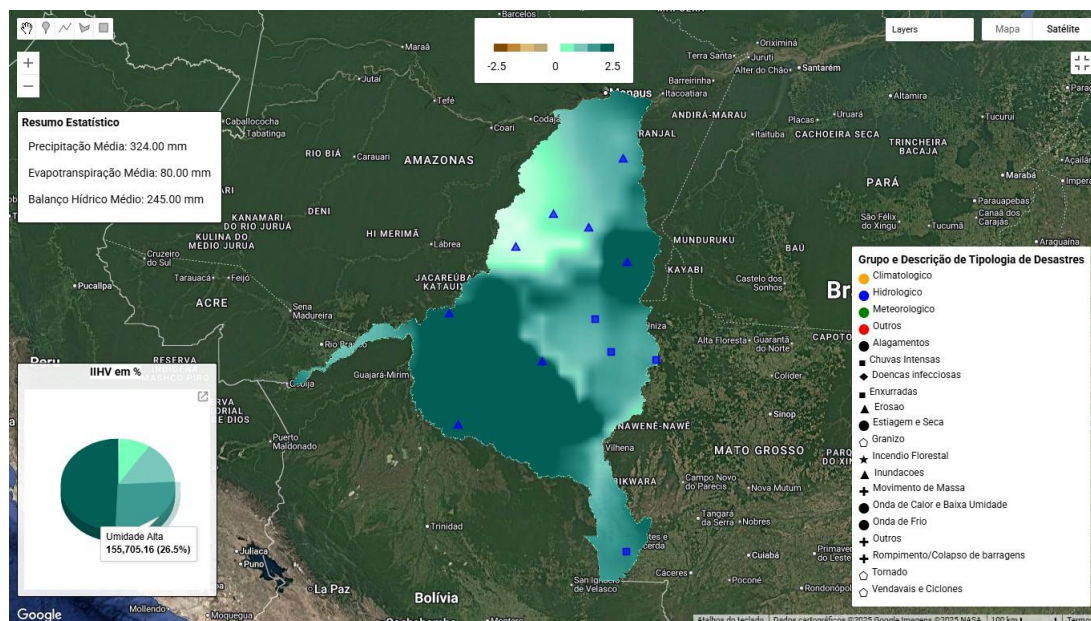
Os índices meteorológicos, SPI₂ (Figura 6) e SPEI₃ (Figura 7), apresentaram um padrão espacial de saturação hídrica extrema e generalizada. Observa-se uma mancha contínua de anomalias positivas severas (tons de azul profundo e verde escuro) cobrindo a quase totalidade da mesorregião. O SPI₂ (“Urgência”) captura o volume precipitado excepcional acumulado nos 60 dias anteriores. Simultaneamente, o SPEI₃ (“Tendência”) exibe idêntica severidade, o que é um diagnóstico crucial: indica que a evapotranspiração, mesmo em uma região tropical, foi incapaz de mitigar o excesso de entrada de água no sistema.

Figura 6 – SPI₂: Março de 2014 na Mesorregião Hidrográfica do Rio Madeira



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 7 – SPEI₃: Março de 2014 na Mesorregião Hidrográfica do Rio Madeira



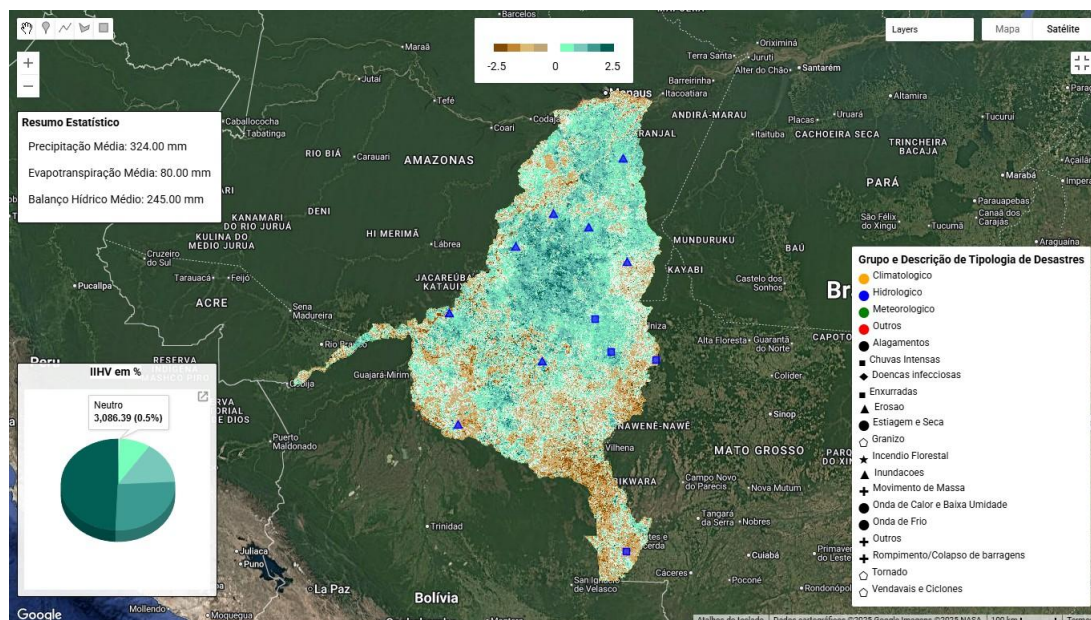
Fonte: Elaborado pelo autor.

Essa redundância positiva entre o SPI e o SPEI sugere que o evento de 2014 não foi apenas um episódio de chuvas intensas, mas um colapso do balanço hídrico regional pelo lado da oferta, onde a capacidade de drenagem e evaporação da bacia foi amplamente superada pelo volume pluviométrico. Este cenário de “transbordamento atmosférico” preparou as condições para a resposta biológica que seria detectada pelos índices de vegetação.

Em contraste com a homogeneidade dos índices meteorológicos, a resposta da biosfera, capturada pelos componentes da dimensão “Gravidade” (G), apresentou uma complexidade espacial acentuada. O EVI_P (Figura 8) e o $NDMI_P$ (Figura 9) exibem um padrão de textura granular, onde pixels de anomalias positivas (azul/verde) se intercalam com áreas de neutralidade ou leve depressão (tons de branco e marrom claro).

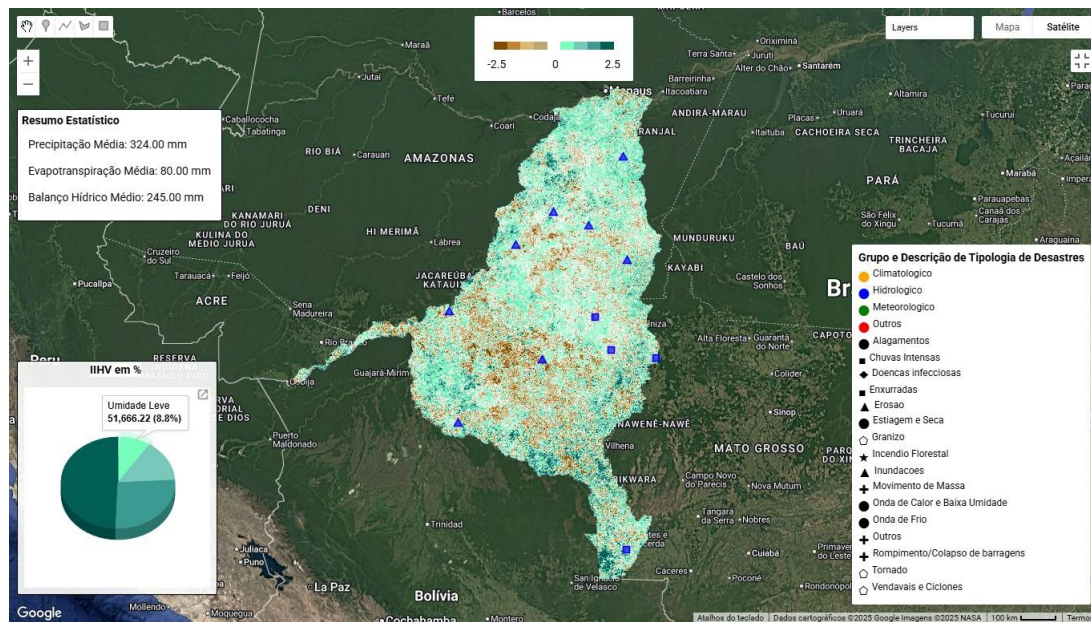
Esta heterogeneidade não indica ausência de impacto, mas reflete as limitações do sensoria-mento remoto óptico e a fisiologia vegetal sob estresse hídrico por excesso. Primeiramente, a intensa cobertura de nuvens associada à ZCIT impõe desafios à composição das imagens MODIS, gerando ruído residual mesmo em produtos compostos mensais. Segundo, o excesso de água no solo pode induzir condições de hipoxia (falta de oxigênio) no sistema radicular, limitando o ganho de biomassa ou alterando a refletância do dossel, impedindo que o EVI atinja valores máximos em todas as áreas inundadas.

Figura 8 – EVI_P : Março de 2014 na Mesorregião Hidrográfica do Rio Madeira



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 9 – NDMI_P: Março de 2014 na Mesorregião Hidrográfica do Rio Madeira



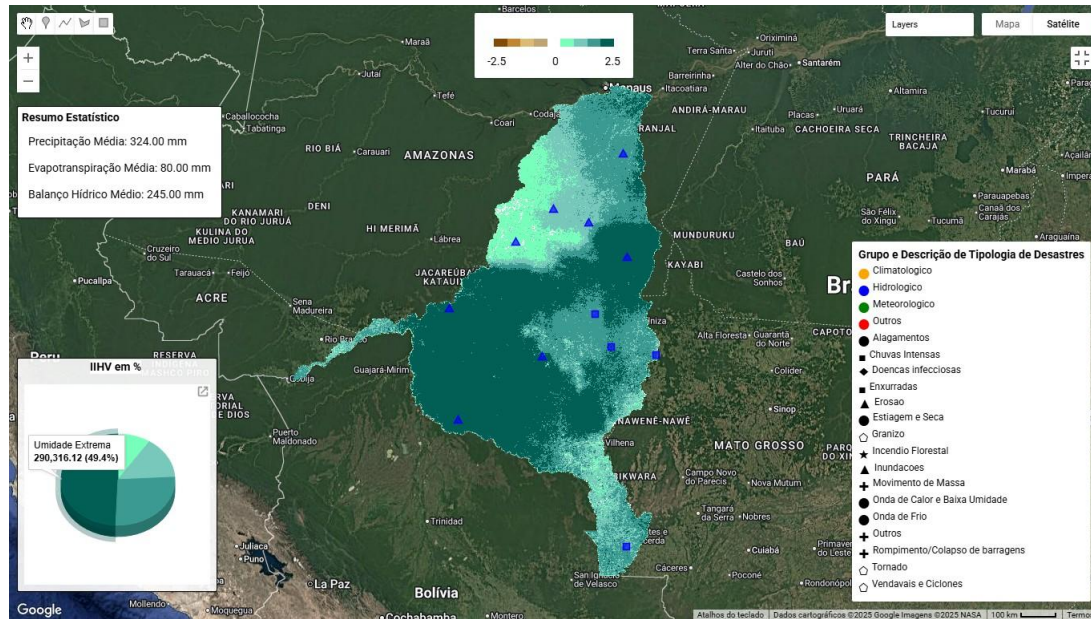
Fonte: Elaborado pelo autor.

Ainda assim, o sinal predominante no NDMI_P confirma o elevado conteúdo de água na estrutura da vegetação, coerente com o cenário de cheia. A dimensão “Gravidade”, portanto, atuou no modelo IIHV de 2014 não apenas como um indicador de vigor, mas como um mapeador da saturação da paisagem, diferenciando áreas de floresta firme (com resposta positiva ao aumento da chuva) das áreas de várzea e baixios saturados.

A integração ponderada destas dimensões resultou em um diagnóstico espacial contundente (Figura 10). O IIHV consolidou a severidade atmosférica com a saturação da paisagem, gerando um mapa dominado por tons de verde-escuro e azul-petróleo.

A análise quantitativa extraída do painel do GEE revela a magnitude do evento: a classe de “Umidade Extrema” (IIHV > 2,0) foi a categoria predominante, abrangendo 49,4% da área total da bacia (aproximadamente 290.316 km²). Se somarmos a esta área as classes de “Umidade Alta” (26,5%) e “Umidade Moderada” (14,8%), conclui-se que 90,7% da Mesorregião Hidrográfica do Rio Madeira encontrava-se sob condições de excesso hídrico no mês de março.

Figura 10 – IIHV: Março de 2014 na Mesorregião Hidrográfica do Rio Madeira



Fonte: Elaborado pelo autor.

Este resultado valida a eficácia do algoritmo GUT em capturar eventos de cheia. O índice não foi atenuado pela heterogeneidade da vegetação; pelo contrário, a combinação de forçantes meteorológicos extremos (pesos U e T) com uma resposta de vegetação predominantemente positiva (peso G) elevou o valor final do índice, alinhando-se perfeitamente com o registro histórico da cota de 19,74 metros em Porto Velho.

Tabela 5 – Quantificação das áreas por classe de severidade do IIHV em Março de 2014

Classe	Área (km ²)	Porcentagem (%)
Umidade Extrema	290.316,12	49,4%
Umidade Alta	155.705,16	26,5%
Umidade Moderada	87.178,12	14,8%
Umidade Leve	51.666,22	8,8%
Neutro	3.086,39	0,5%
Seca Leve	0,00	0,0%
Seca Moderada	0,00	0,0%
Seca Severa	0,00	0,0%
Seca Extrema	0,00	0,0%

Área Total Calculada: $\approx 587.952 \text{ km}^2$

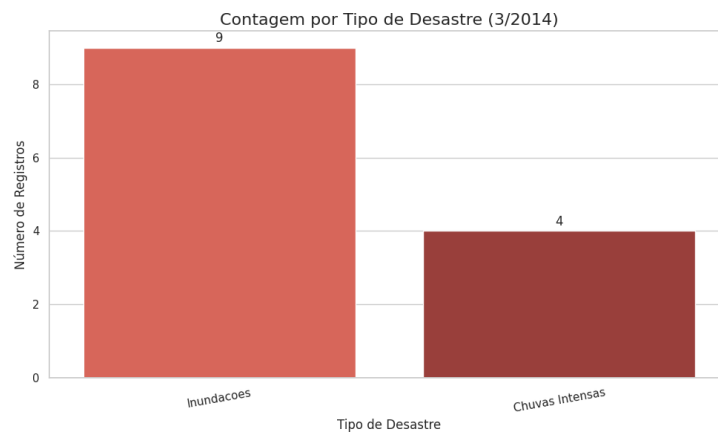
Fonte: Elaborado pelo autor.

Cientificamente, o comportamento do IIHV em 2014 demonstra o que se denomina Sinergia Multitemporal. Enquanto o SPI_2 capturou o pulso de inundação imediato (o ‘choque’), o $SPEI_3$ evidenciou a saturação da memória hidrológica da bacia. A análise crítica revela que a heterogeneidade observada nos índices de vegetação (EVI_P e $NDMI_P$) não deve ser lida como falha do sensor, mas como um indicador de estresse por anoxia. O excesso de água no solo satura os poros, impedindo a respiração radicular, o que se traduz em uma resposta biofísica de ‘platô’ ou leve declínio no vigor. Ao integrar essas variáveis, o IIHV agiu como um filtro que validou a cheia não apenas pela chuva que caiu, mas pela incapacidade do ecossistema em drenar esse excesso, confirmando o estado de calamidade registrado em Porto Velho.

4.1.3 Avaliação Conjunta com Registros de Desastres

A magnitude do evento hidrometeorológico capturado pelo IIHV é corroborada pela análise dos registros oficiais do S2ID. A distribuição tipológica dos desastres em março de 2014 (Figura 11) revela uma predominância absoluta de registros classificados como “Inundação”, em detrimento de “Enxurradas” ou “Alagamentos”. Esta distinção é fundamental para a validação do índice: enquanto enxurradas são eventos de resposta rápida e curta duração, as inundações na Amazônia são fenômenos de evolução lenta e persistente, coerentes com a “Memória do Sistema” incorporada pelos componentes de curto e médio prazo do IIHV (SPI_2 e $SPEI_3$).

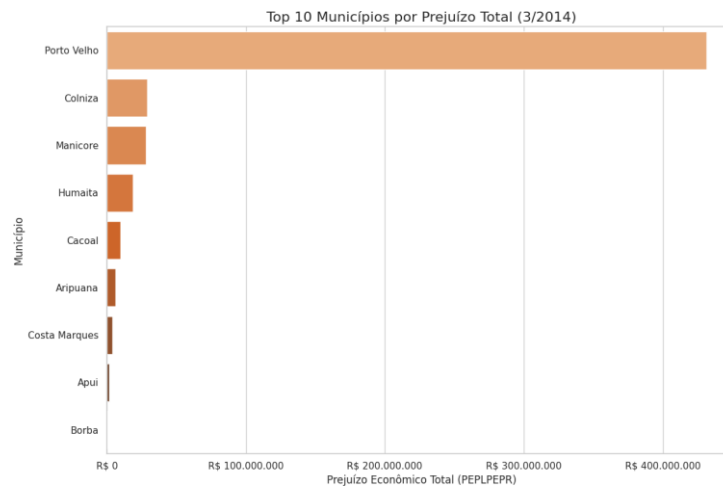
Figura 11 – Março de 2014: Contagem por Tipo de Desastres



Fonte: Elaborado pelo autor.

A análise espacial dos impactos (Figura 12) confirma que o epicentro do desastre coincidiu com as áreas de maior intensidade do IIHV. O município de Porto Velho liderou os registros de prejuízos econômicos, seguido por Colniza e Manicore. Esta concentração espacial valida a capacidade do índice de discriminar não apenas a ocorrência temporal, mas a localização geográfica das áreas críticas.

Figura 12 – Março de 2014: Os 10 Municípios Mais Afetados por Prejuízo Total

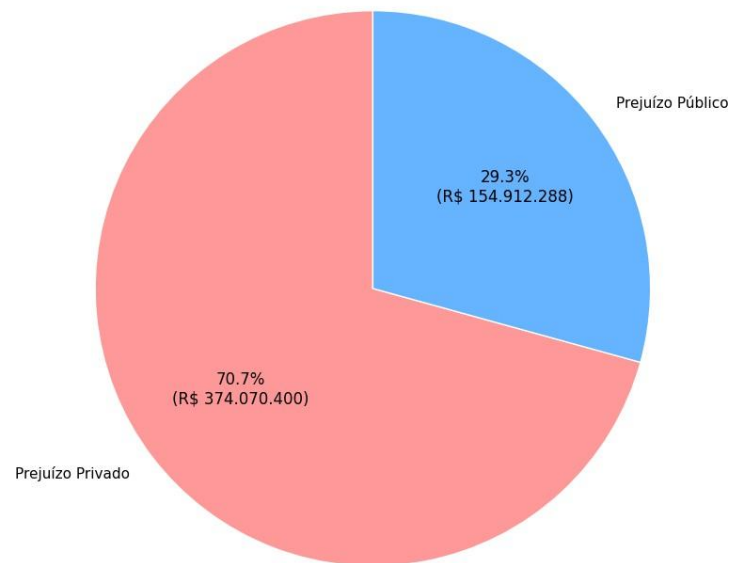


Fonte: Elaborado pelo autor.

Do ponto de vista econômico, a decomposição dos prejuízos (Figura 13 e Figura 15) demonstra que, embora os danos à infraestrutura pública tenham sido massivos, os prejuízos privados foram mais devastadores, com destaque para o setor da Indústria (paralisação de uma das maiores hidrelétricas do país - **Usina Hidrelétrica de Santo Antônio**) e Agricultura. Este último dado reforça a importância dos componentes de vegetação (EVI_P e $NDMI_P$) na matriz do IIHV, uma vez que estas atividades dependem diretamente das condições do solo e da saúde da vegetação, que foram severamente comprometidas pelo excesso hídrico persistente, resultando em perdas de safras.

Figura 13 – Março de 2014: Prejuízo Público versus Privado

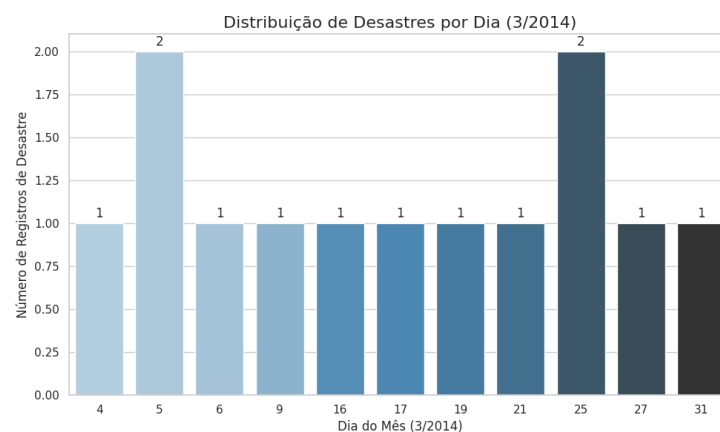
Prejuízo Total em 3/2014: Público vs. Privado



Fonte: Elaborado pelo autor.

A cronologia dos registros (Figura 14) mostra uma distribuição contínua de ocorrências ao longo de todo o mês de março, sem hiatos significativos. Isso indica que o estresse ambiental não foi pontual, mas sim um estado contínuo de emergência, exatamente como representado pela mancha persistente de “Umidade Extrema” nos mapas do IIHV.

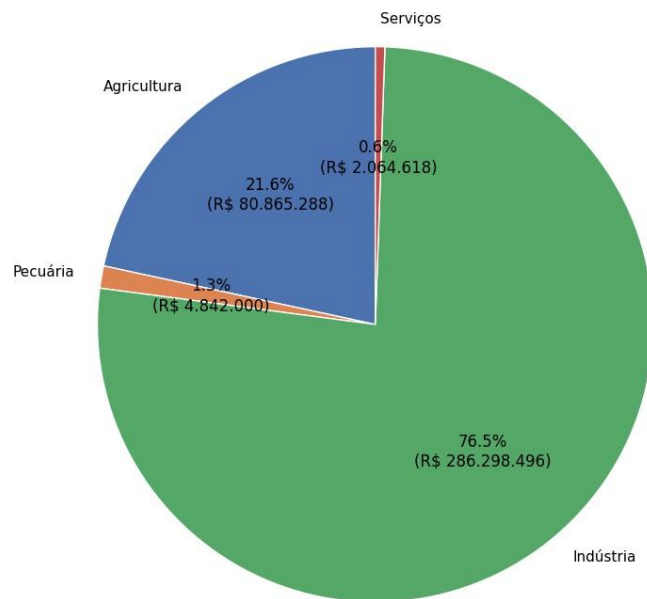
Figura 14 – Março de 2014: Distribuição de desastres por Dia



Fonte: Elaborado pelo autor.

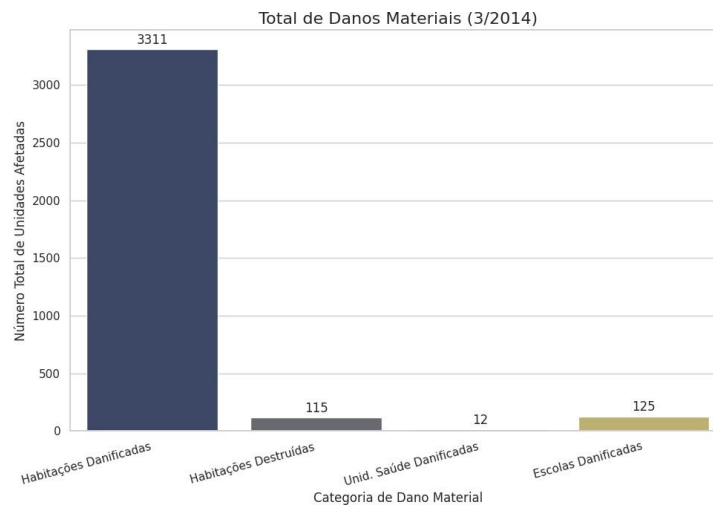
Figura 15 – Março de 2014: Composição dos Prejuízos Privados

Composição do Prejuízo Econômico Privado Total em 3/2014



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 16 – Março de 2014: Total de Unidades Afetadas



Fonte: Elaborado pelo autor.

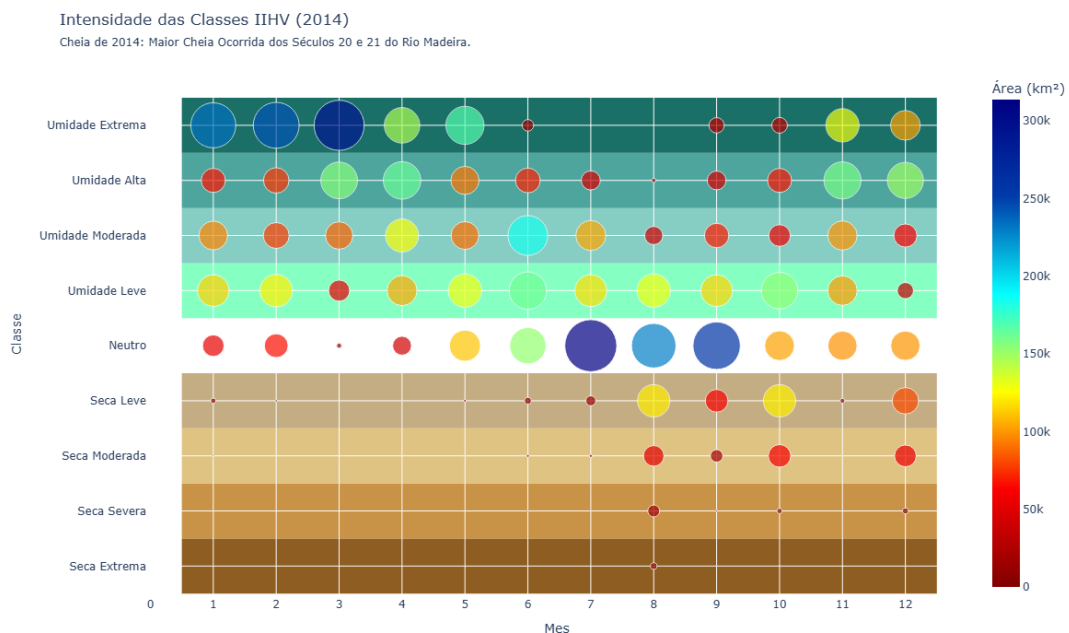
4.1.4 Análise Quantitativa por Classe do IIHV em 2014

A evolução temporal das classes do IIHV ao longo de 2014 oferece uma perspectiva quantitativa da dinâmica da cheia, permitindo identificar as fases de ascensão, pico e recessão do evento. A análise do gráfico de intensidade (Figura 17), processado a partir das séries temporais do Google Earth Engine, revela a seguinte progressão:

1. **Fase de Ascensão (Janeiro-Fevereiro):** Observa-se uma expansão rápida das classes úmidas. Já em fevereiro, as classes “Umidade Alta” e “Umidade Extrema” começam a dominar a área da bacia, respondendo ao acúmulo de precipitação detectado pelo SPI₂.
2. **Pico do Evento (Março):** O mês de março marca o clímax hidrometeorológico. Neste período, a classe “Umidade Extrema” (IIHV > 2,0) atingiu sua extensão máxima, cobrindo aproximadamente 49,4% da área total da Mesorregião Hidrográfica (cerca de 290 mil km²). Somada à classe “Umidade Alta”, mais de 75% da bacia encontrava-se sob condições de excesso hídrico severo. Este pico coincide temporalmente com a cota máxima histórica de 19,74 metros registrada em Porto Velho.
3. **Histerese e Recessão (Abril-Junho):** Um aspecto crucial revelado pelo gráfico é a histerese do sistema. Mesmo após a diminuição das chuvas (fator meteorológico), as classes de umidade do IIHV retraíram-se lentamente. Em abril e maio, embora a área de “Umidade Extrema” tenha diminuído, a bacia permaneceu predominantemente nas classes “Moderada” e “Alta”. Isso demonstra a sensibilidade dos componentes de vegetação (EVI/NDMI) e do SPEI em capturar a permanência da água no sistema (inundação de várzeas e saturação do solo) muito além do período chuvoso imediato.

Esta quantificação evidencia que o IIHV não funciona apenas como um “gatilho” instantâneo, mas como um monitor de duração do evento, capaz de representar a inércia hidrológica característica da Bacia Amazônica.

Figura 17 – Intensidade das Classes de IIHV em 2014



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2 Validação do IIHV na seca extrema de 2023

4.2.1 Contexto do Evento

O ano de 2023 foi caracterizado por uma das secas mais severas já registradas na Amazônia, com impactos particularmente intensos na bacia do Rio Madeira. Em outubro daquele ano, o rio atingiu a cota mínima de 1,10 metros em Porto Velho, o menor nível observado em 56 anos de monitoramento. A seca comprometeu a navegabilidade do rio, afetou o abastecimento de comunidades ribeirinhas, reduziu a geração hidrelétrica das usinas de Santo Antônio e Jirau, e provocou mortandade de peixes e botos em escala sem precedentes.

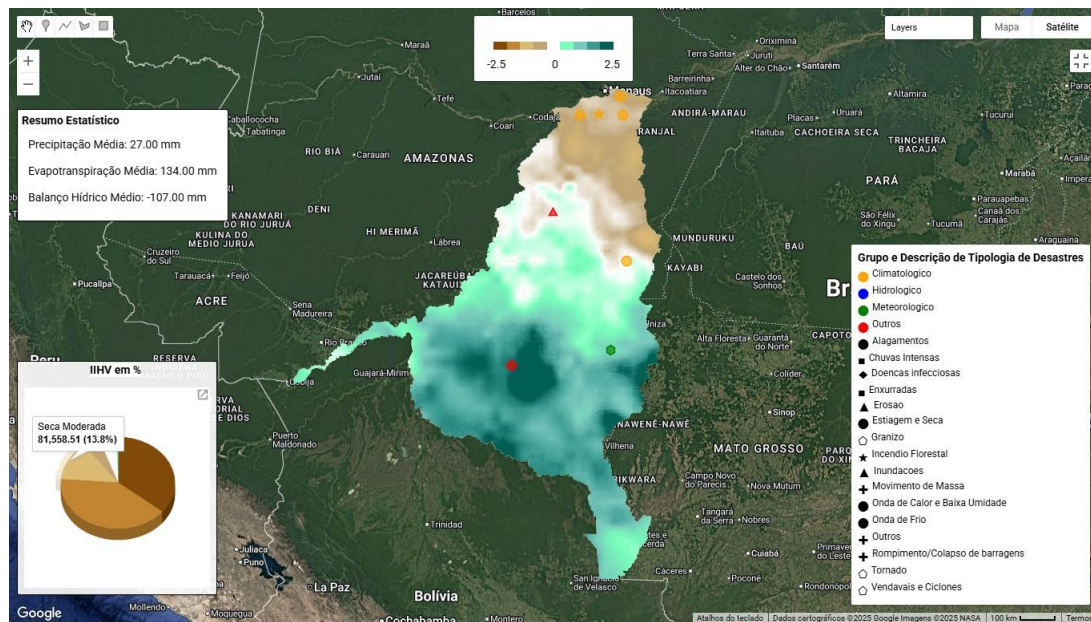
Do ponto de vista climatológico, o evento de 2023 foi associado ao desenvolvimento de um episódio de El Niño de forte magnitude combinado com águas superficiais anormalmente aquecidas no Atlântico Tropical Norte, configuração que reduziu drasticamente a atividade convectiva sobre a Amazônia durante o período de transição para a estação chuvosa. Esta conjuntura ofereceu condições ideais para avaliar a sensibilidade do IIHV a extremos de déficit hídrico.

4.2.2 Comportamento dos Índices Componentes

A análise dos componentes do IIHV no mês de setembro de 2023 revela o momento de maior intensidade do estresse climatológico sobre a Mesorregião Hidrográfica do Rio Madeira. Diferentemente do evento de cheia de 2014, onde a resposta foi amplamente distribuída, a seca de 2023 apresentou uma dicotomia marcante entre a condição atmosférica imediata e a resistência inicial da biosfera.

Os índices meteorológicos apresentaram comportamentos divergentes, revelando a natureza térmica deste evento de seca. O SPI₂ (Figura 18) exibiu um padrão espacial heterogêneo: embora núcleos de seca leve e moderada (tons de marrom) dominem a porção norte da bacia, observam-se áreas de normalidade e até de umidade extrema (tons de ciano) no setor centro-sul. Isso indica que a supressão da precipitação, componente de “Urgência”, não foi uniforme em toda a região naquele momento.

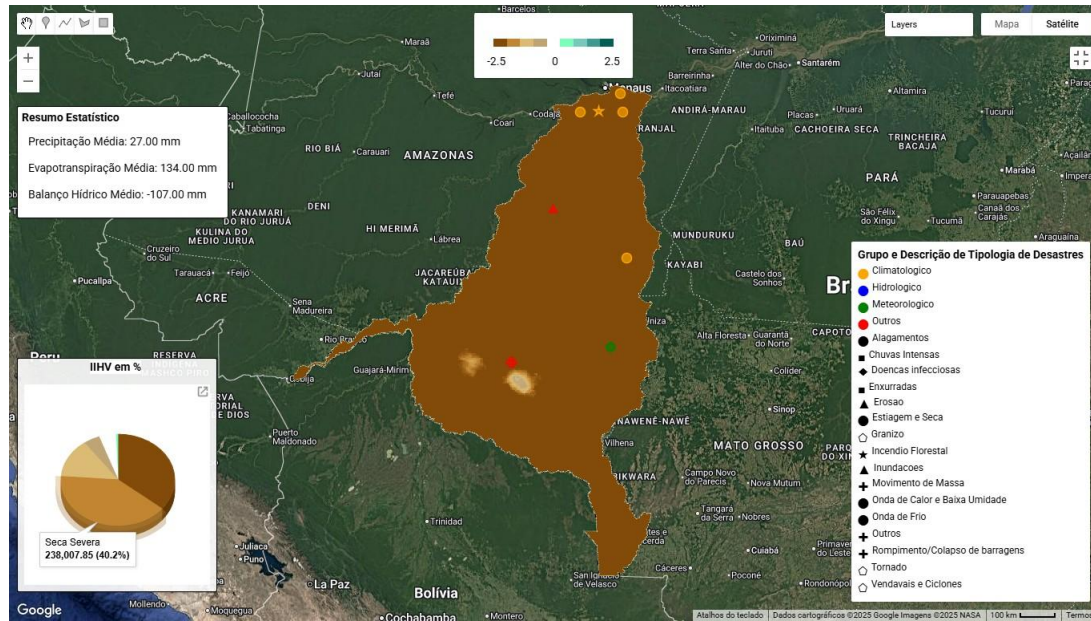
Figura 18 – SPI₂: Setembro de 2023 na Mesorregião Hidrográfica do Rio Madeira



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em contrapartida, o SPEI₃ (Figura 19) demonstrou um déficit hídrico extremo e generalizado, cobrindo virtualmente toda a extensão territorial da mesorregião com anomalias negativas severas. A discrepância entre o SPI₂ (menos intenso espacialmente) e o SPEI₃ (intensamente generalizado) evidencia o papel crítico da temperatura no evento de 2023. A “Tendência” negativa foi drasticamente amplificada pela alta evapotranspiração potencial, demonstrando que o estresse hídrico na bacia foi impulsionado tanto pela irregularidade das chuvas quanto pelo calor excessivo, colapsando o balanço hídrico mesmo nas áreas onde a precipitação não foi totalmente suprimida.

Figura 19 – SPEI₃: Setembro de 2023 na Mesorregião Hidrográfica do Rio Madeira



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em contraste com a severidade atmosférica, os índices de vegetação, componentes da dimensão “Gravidade” (G), revelaram uma inércia biológica significativa. Tanto o EVI_P (Figura 20) quanto o $NDMI_P$ (Figura 21) apresentaram um padrão espacial de mosaico, marcadamente distinto da homogeneidade observada no $SPEI_3$.

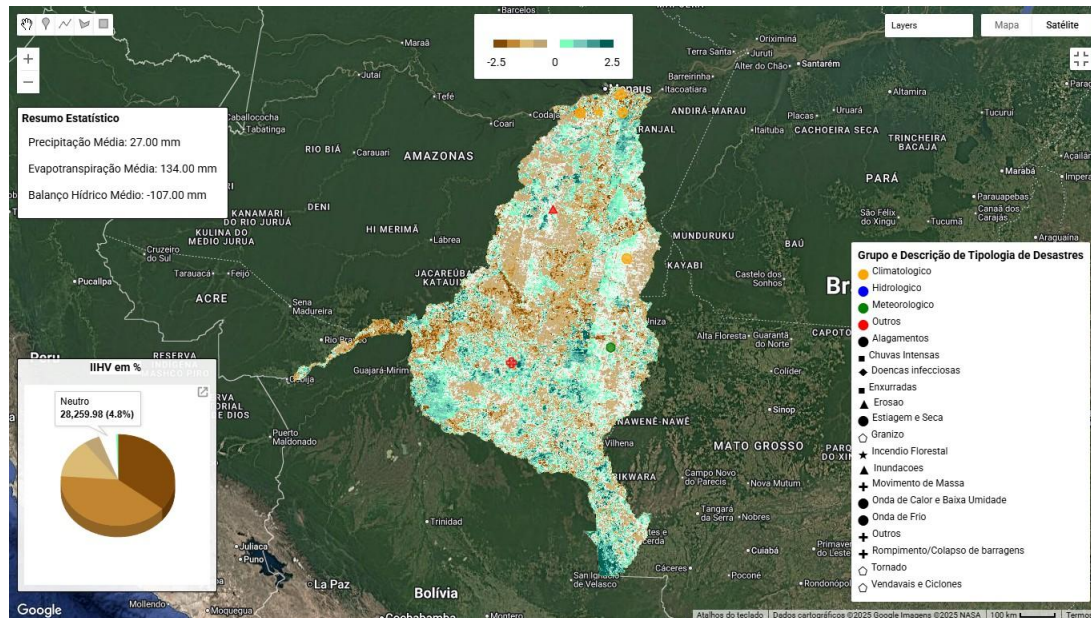
Observam-se vastas áreas com anomalias neutras e até positivas (tons de azul e ciano) predominando nas porções central e norte da mesorregião. As anomalias negativas (tons de marrom), indicativas de perda de vigor fotossintético ou redução do conteúdo de água no dossel, aparecem de forma fragmentada, não refletindo imediatamente a crise hídrica instalada na atmosfera.

Este comportamento ilustra o efeito de retardo (time-lag) da resposta da vegetação amazônica. Em setembro, apesar da demanda evaporativa extrema (calor), o sistema radicular profundo da floresta ainda acessava reservas de água no solo, mantendo o turgor e o verdor do dossel. Assim, a dimensão “Gravidade” do IIHV atuou neste mês como um fator moderador, impedindo que o índice final indicasse “Seca Extrema” em 100% da bacia, e restringindo as áreas críticas aos locais onde o estresse atmosférico já havia vencido a resistência da vegetação.

A divergência observada entre o SPI_2 e o $SPEI_3$ em setembro de 2023 é o achado mais contundente desta validação. Este fenômeno caracteriza o que a literatura recente define como *Seca Termicamente Induzida* ou *Flash Drought*. O fato de o balanço hídrico ($SPEI$) ser drasticamente mais severo que a falta de chuva (SPI) prova que o motor do desastre em 2023 foi a anomalia térmica. O IIHV, ao atribuir peso 3 à ‘Tendência’ ($SPEI_3$), capturou o colapso do sistema meses antes dos registros administrativos do S2ID. Esta é a prova do ganho informacional antecipatório do índice: ele identificou que a atmosfera estava ‘sugando’ a umidade da bacia em uma taxa

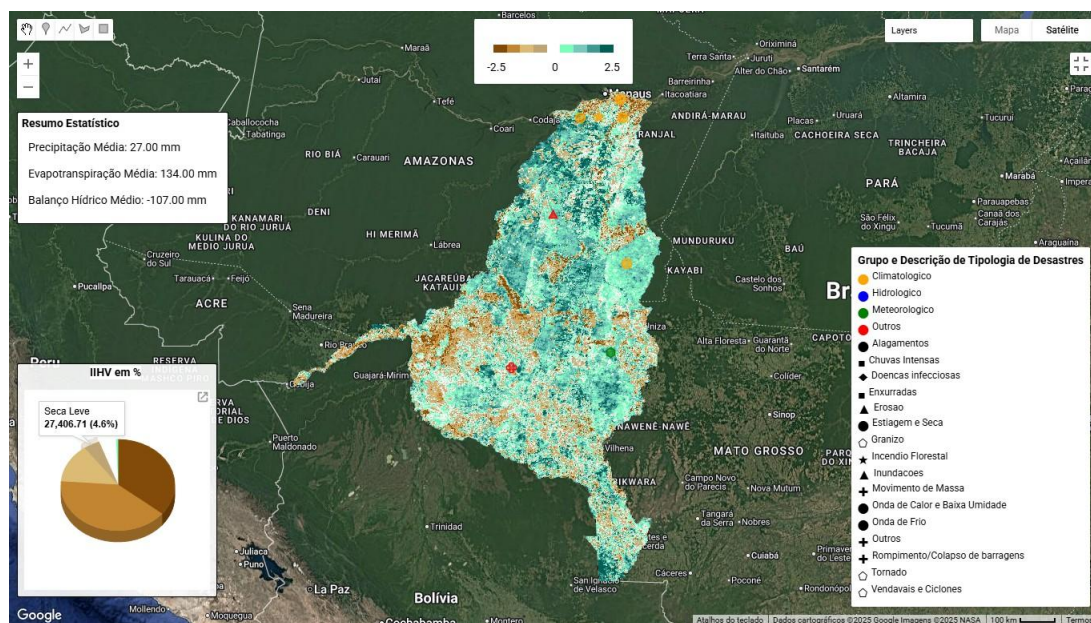
superior à capacidade de reposição, um diagnóstico que índices focados apenas em chuva seriam incapazes de emitir.

Figura 20 – EVI_p : Setembro de 2023 na Mesorregião Hidrográfica do Rio Madeira



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 21 – $NDMI_p$: Setembro de 2023 na Mesorregião Hidrográfica do Rio Madeira



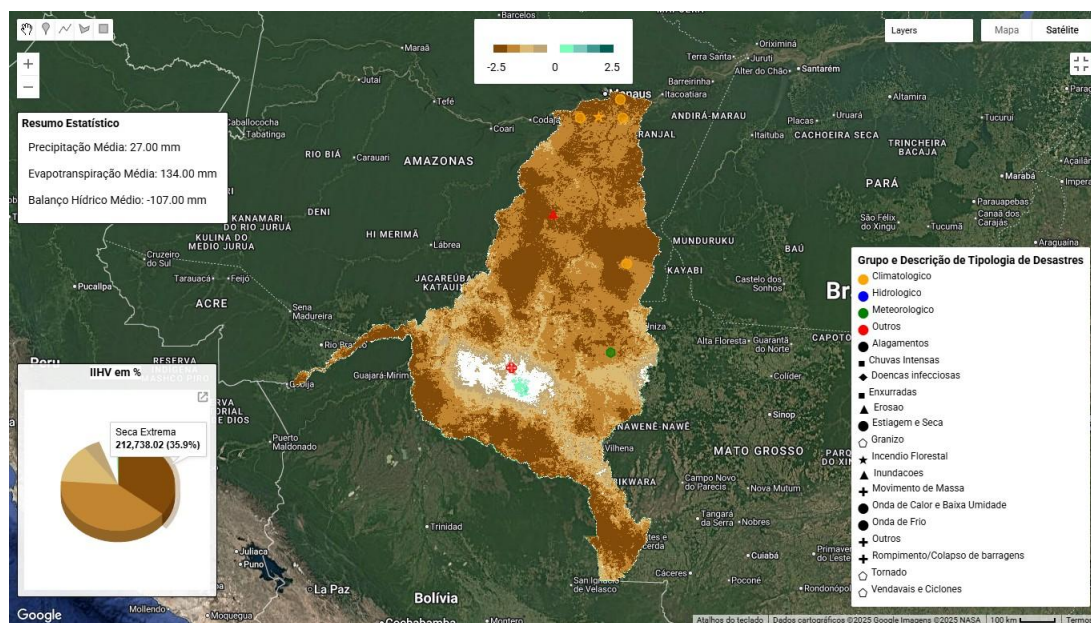
Fonte: Elaborado pelo autor.

A integração destas dimensões pelo IIHV resultou em um cenário de alerta crítico, porém claramente modulado pela resposta da vegetação (Figura 22). Ao contrário da homogeneidade vermelha do $SPEI_3$, o mapa final do IIHV exibe um gradiente de severidade mais complexo.

A análise quantitativa confirma que, embora as condições de seca (da classe Leve à Extrema) dominassem aproximadamente 94,58% da bacia (cerca de 559.711,09 km²), a intensidade do fenômeno foi atenuada pela componente biológica. As classes predominantes foram: Seca Leve (~4,6%), Seca Moderada (~13,8%), Seca Severa (~40,2%) e Seca Extrema (~35,9%). A classe neutra, embora presente, ficou restrita a núcleos específicos totalizando cerca de 28.259,98 km² (aproximadamente 4,8% da área total), concentrados principalmente nos setores onde a resistência da vegetação ainda não havia sido superada pelo estresse atmosférico.

Portanto, em setembro de 2023, o IIHV demonstrou sua robustez ao não replicar cegamente o alarmismo do índice climático (SPEI), mas sim ponderá-lo com a realidade da superfície (EVI/NDMI). O índice diagnosticou corretamente uma bacia sob forte pressão hídrica, mas identificou que o colapso ambiental total (“Seca Extrema”) ainda estava restrito a focos específicos (cerca de 212,738.02 km², ~35,9%), funcionando como um monitor sensível da capacidade de suporte do ecossistema frente ao evento climático em curso.

Figura 22 – IIHV: Setembro de 2023 na Mesorregião Hidrográfica do Rio Madeira



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 6 – Quantificação das áreas por classe de severidade do IIHV em Setembro de 2023

Classe	Área (km ²)	Porcentagem (%)
Umidade Extrema	0,00	0,0%
Umidade Alta	10,94	0,0%
Umidade Moderada	288,54	0,0%
Umidade Leve	3.500,01	0,6%
Neutro	28.259,98	4,8%
Seca Leve	27.406,71	4,6%
Seca Moderada	81.558,51	13,8%
Seca Severa	238.007,85	40,2%
Seca Extrema	212.738,02	35,9%

Área Total Calculada: $\approx 591.770 \text{ km}^2$

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.3 Avaliação Conjunta com Registros de Desastres

A validação do IIHV no evento de 2023 exige uma compreensão da temporalidade distinta entre o estresse climático e o impacto socioeconômico. Enquanto a análise das seções anteriores identificou setembro como o pico da severidade hidrometeorológica (menor precipitação e maior calor), os registros do S2ID indicam que o ápice dos decretos de emergência e contabilização de prejuízos ocorreu em dezembro. Este descompasso temporal não representa uma inconsistência, mas sim a manifestação clássica da histerese hidrológica e social das secas: os rios demoram a recuperar seu nível e os sistemas produtivos colapsam meses após o início do déficit hídrico.

A tipologia dos desastres registrados em dezembro (Figura 23) é inequívoca: 100% das ocorrências foram classificadas como “Estiagem e Seca”. A distribuição temporal dentro do mês (Figura 26) mostra uma concentração massiva de registros nos primeiros quinze dias de dezembro. Isso sugere um reconhecimento administrativo tardio ou cumulativo de uma situação de calamidade que se arrastava desde o pico climático de setembro/outubro, evidenciando que o IIHV funcionou como um indicador antecipado da crise.

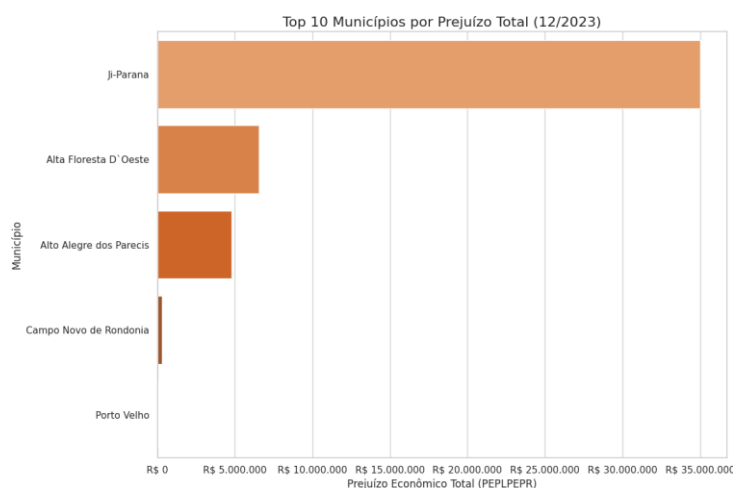
Figura 23 – Dezembro de 2023: Contagem por Tipo de Desastres



Fonte: Elaborado pelo autor.

A análise espacial dos prejuízos (Figura 24) destaca o município de Ji-Paraná como o mais afetado, com perdas de 35 milhões de reais, seguido por Alta Floresta D'Oeste e Alto Alegre dos Parecis. A localização destes municípios, na porção mais a jusante da bacia (próximo à foz do Madeira no Amazonas), corrobora a propagação da onda de seca, que afeta primeiramente as cabeceiras hidrológicas e, com o passar do tempo, compromete o fluxo e a navegabilidade no baixo curso do rio.

Figura 24 – Dezembro de 2023: Os 10 Municípios Mais Afetados por Prejuízo Total

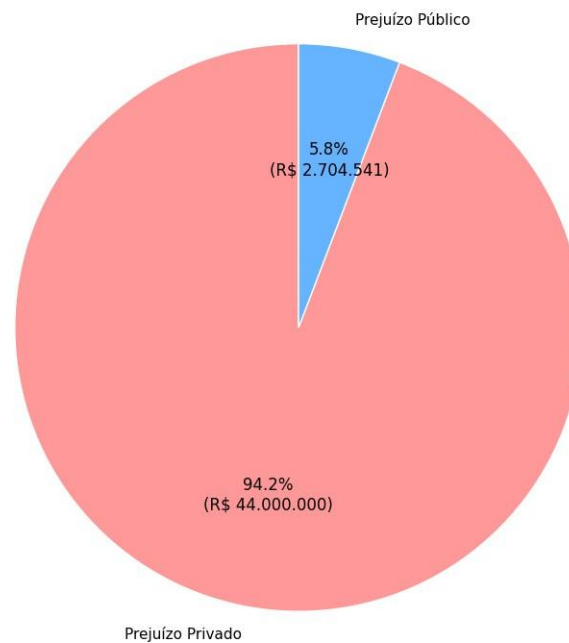


Fonte: Elaborado pelo autor.

Do ponto de vista econômico, a seca de 2023 teve um perfil devastador para o setor produtivo. Ao contrário das cheias, que frequentemente destroem infraestrutura pública, os dados de dezembro (Figura 25) revelam que os Prejuízos Privados foram muito superiores aos Públicos. A decomposição destes prejuízos (Figura 27) aponta que os setores de Agricultura e Pecuária foram os mais afetados, absorvendo a totalidade das perdas financeiras em 87,5%.

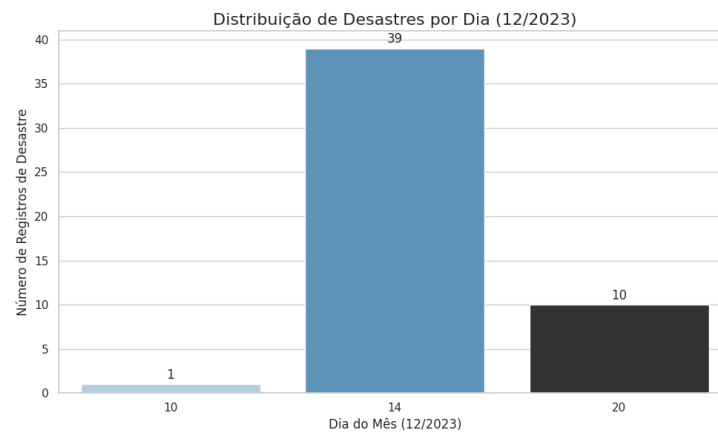
Figura 25 – Dezembro de 2023: Prejuízo Público versus Privado

Prejuízo Total em 12/2023: Público vs. Privado



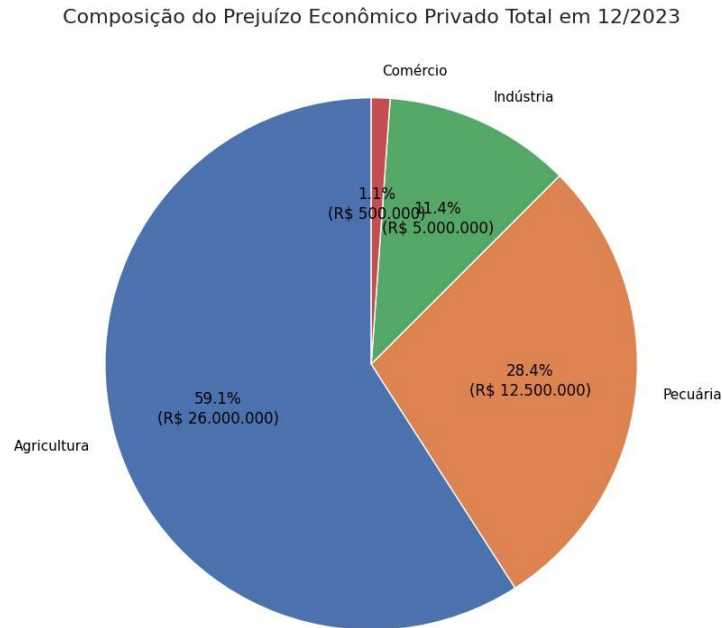
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 26 – Dezembro de 2023: Distribuição de desastres por Dia



Fonte: Elaborado pelo autor.

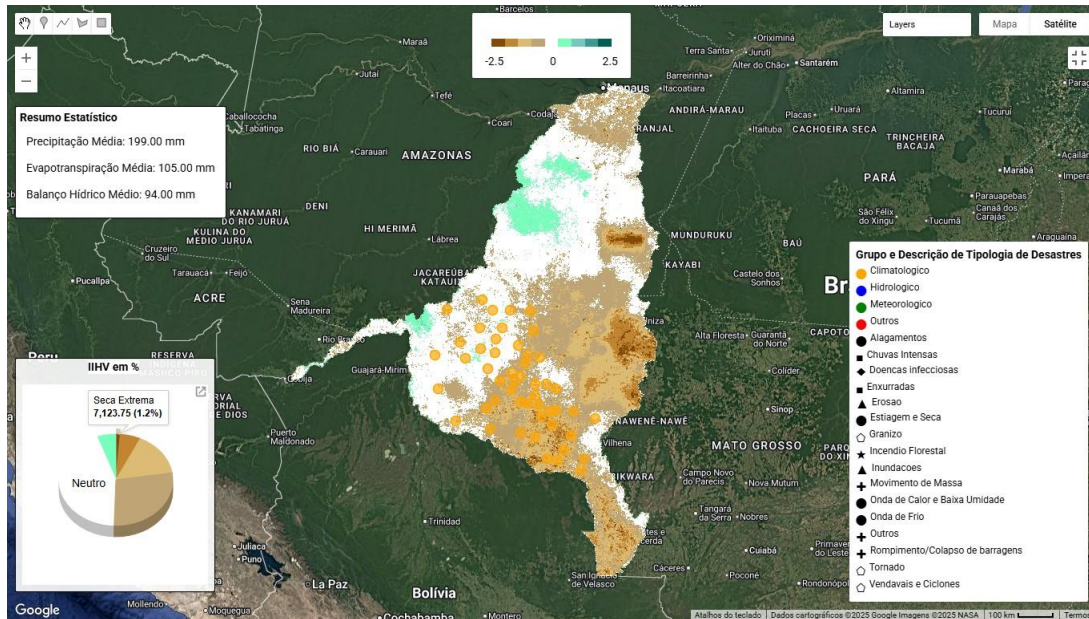
Figura 27 – Dezembro de 2023: Composição dos Prejuízos Privados



Fonte: Elaborado pelo autor.

Este dado valida robustamente a inclusão dos componentes de vegetação (EVI_P e $NDMI_P$) na formulação do IIHV. O estresse na vegetação detectado pelo índice nos meses anteriores (setembro/outubro) traduziu-se, em dezembro, em quebra de safra e perda de rebanho. Assim, a dimensão “Gravidade” do IIHV demonstrou alta correlação com a realidade econômica local, provando ser um previsor eficaz de perdas no setor primário. O mapa do IIHV de dezembro (Figura 28), que já apresenta áreas de recuperação (tons claros) misturadas a focos de seca remanescente, reflete o início da transição climática, enquanto a sociedade ainda contabilizava os prejuízos do evento extremo.

Figura 28 – IIHV: Dezembro de 2023 na Mesorregião Hidrográfica do Rio Madeira



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 7 – Quantificação das áreas por classe de severidade do IIHV em Dezembro de 2023

Classe	Área (km ²)	Porcentagem (%)
Umidade Extrema	1.840,40	0,3%
Umidade Alta	4.028,98	0,7%
Umidade Moderada	7.856,77	1,3%
Umidade Leve	14.845,89	2,5%
Neutro	261.262,51	44,4%
Seca Leve	165.444,66	28,1%
Seca Moderada	91.580,56	15,6%
Seca Severa	34.732,92	5,9%
Seca Extrema	7.123,75	1,2%

Área Total Calculada: $\approx 588.716 \text{ km}^2$

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.4 Análise Quantitativa por Classe do IIHV

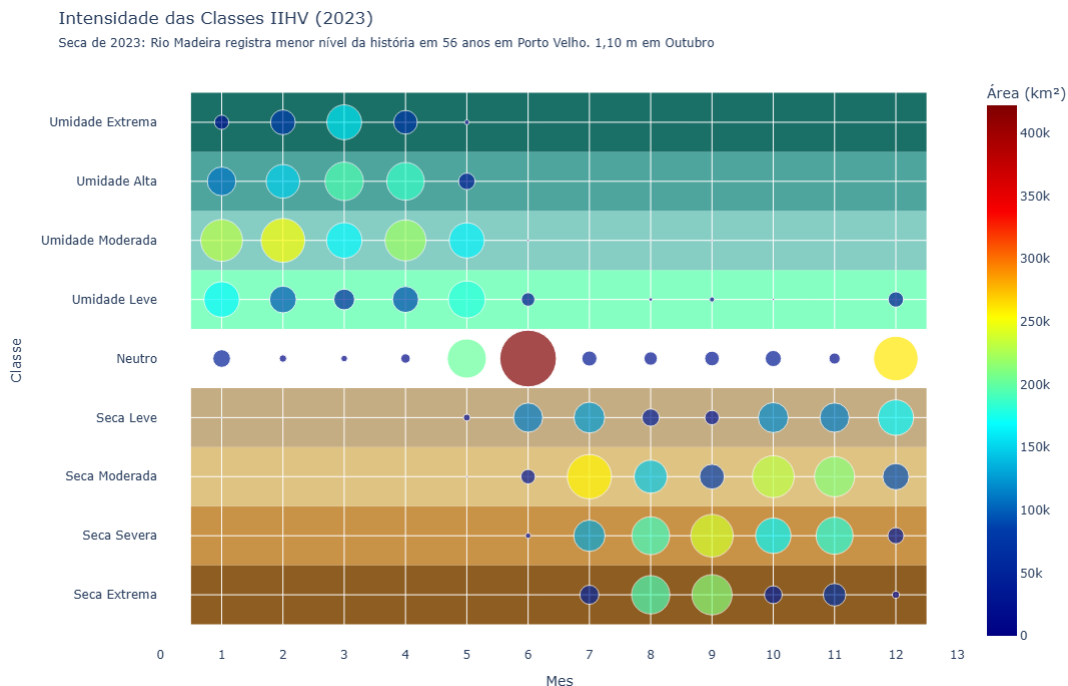
A evolução temporal das classes do IIHV ao longo de 2023 oferece uma perspectiva dinâmica da severidade da seca, permitindo identificar as fases de início, intensificação abrupta e persistência do evento. A análise do diagrama de áreas empilhadas (Figura 29), processado a partir das

séries temporais mensais, revela três fases distintas no comportamento hidrometeorológico da bacia:

1. **Fase de Normalidade (Janeiro a Maio):** O primeiro semestre foi caracterizado pela predominância das classes de “Umidade” e “Neutro”. Até o mês de maio, as classes de seca crítica (“Severa” e “Extrema”) eram virtualmente inexistentes (abaixo de 0,1% da área total), refletindo o final da estação chuvosa e o armazenamento de água no sistema.
2. **Intensificação Abrupta (Junho a Setembro):** A partir de junho, observa-se uma inflexão drástica nas curvas. O fenômeno, característico de uma Flash Drought (seca relâmpago), manifestou-se pela rápida substituição da classe “Neutro” (cor branca) pelas classes de seca. Em julho, as classes críticas já ocupavam cerca de 30% da bacia. O agravamento acelerou-se até atingir o ápice em setembro, quando as classes “Seca Severa” e “Seca Extrema” somadas dominaram impressionantes 76,1% da mesorregião (aproximadamente 450.000 km²), confinando as áreas de normalidade a uma fração marginal do território.
3. **Persistência e Histerese (Outubro a Dezembro):** O último trimestre revela a resiliência do evento extremo. Embora a área de “Seca Extrema” (marrom escuro) tenha recuado significativamente em outubro e dezembro, as classes de “Seca Severa” e “Moderada” mantiveram-se expressivas. Em novembro, houve inclusive um repique secundário da área de seca crítica (cobrindo 42% da bacia), retardando a recuperação do sistema. Em dezembro, mesmo com o retorno das chuvas, cerca de 50% da bacia ainda permanecia sob algum grau de estresse hídrico (do Leve ao Extremo), explicando a continuidade dos impactos socioeconômicos e a decretação de emergências neste período.

Esta análise quantitativa demonstra que o IIHV foi capaz de capturar não apenas a magnitude estática do evento, mas a velocidade de sua evolução, um parâmetro crítico para sistemas de alerta precoce.

Figura 29 – Intensidade das Classes de IIHV em 2023



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3 Análise de sensibilidade da Matriz GUT

Para avaliar a robustez do IIHV e a influência dos pesos atribuídos a cada dimensão, foi realizada uma análise de sensibilidade comparando a configuração base (**G1-U2-T3**) com três cenários alternativos: priorização da **Urgência (G1-U3-T2)**, **ponderação intermediária (G2-U3-T1)** e priorização da **Gravidade (G3-U2-T1)**.

4.3.1 Março de 2014

A comparação quantitativa para o mês de março de 2014 (Tabela 8) revela que a alteração dos pesos modifica significativamente a magnitude da área classificada como crítica, confirmando que a calibração da matriz é determinante para a acurácia do índice.

Tabela 8 – Comparação da área de "Umidade Extrema" em março de 2014 sob diferentes configurações da Matriz GUT

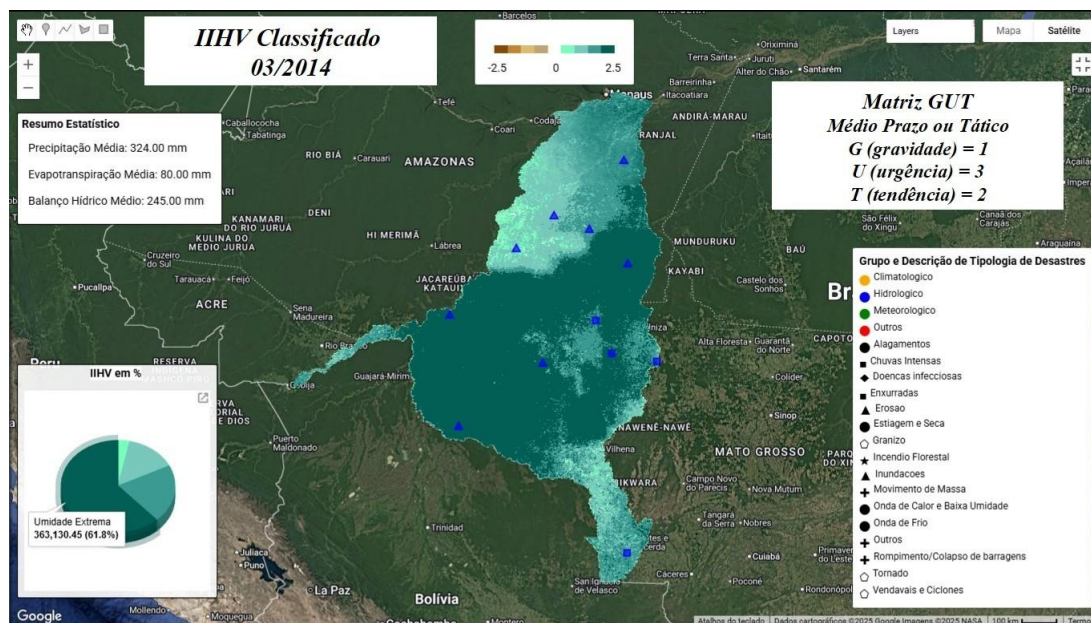
Configuração	Foco Principal	Área Úmida Extrema (km²)	% da Bacia
G1-U3-T2	Precipitação (Urgência)	363.130,45	61,8%
G1-U2-T3	Clima/Tendência (Base)	290.316,12	49,4%
G2-U3-T1	Intermediário	220.484,86	37,5%
G3-U2-T1	Vegetação (Gravidade)	51.258,55	8,7%

Fonte: Elaborado pelo autor.

A análise espacial dos mapas evidencia o comportamento de cada cenário:

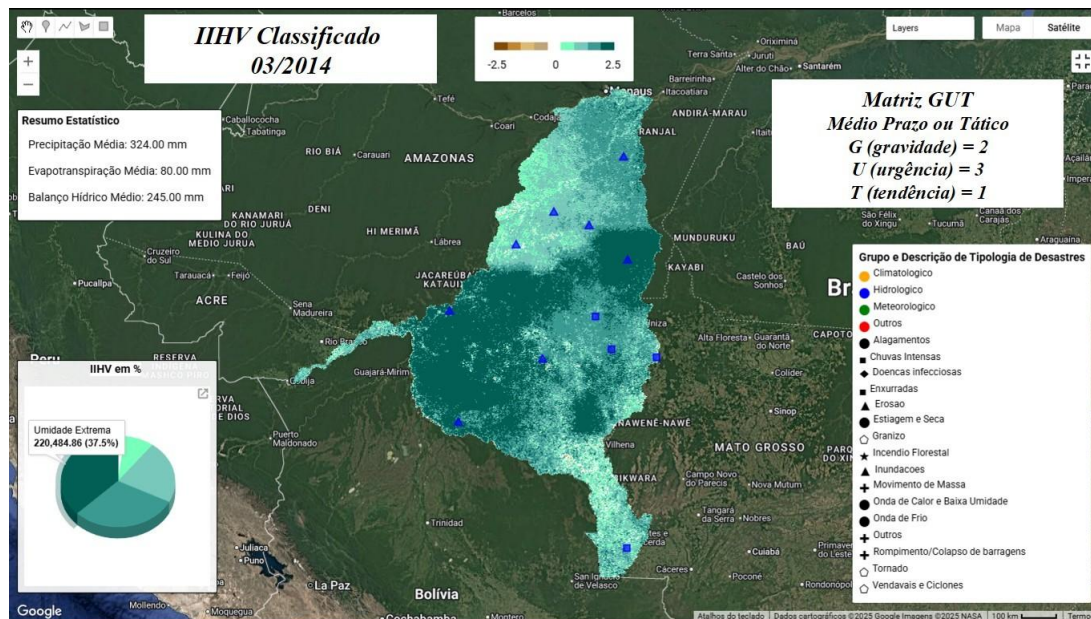
1. **Cenário G1-U3-T2 (Figura 30):** Ao maximizar o peso da Precipitação (Urgência), o índice tende à superestimação, classificando mais de 60% da bacia como “Extrema”. Embora sensível, esta configuração pode gerar falsos positivos ao não considerar a capacidade de amortecimento do sistema.

Figura 30 – IIHV: Março de 2014 na Mesorregião Hidrográfica do Rio Madeira Matriz GUT de médio prazo: G1-U3-T2



Fonte: Elaborado pelo autor.

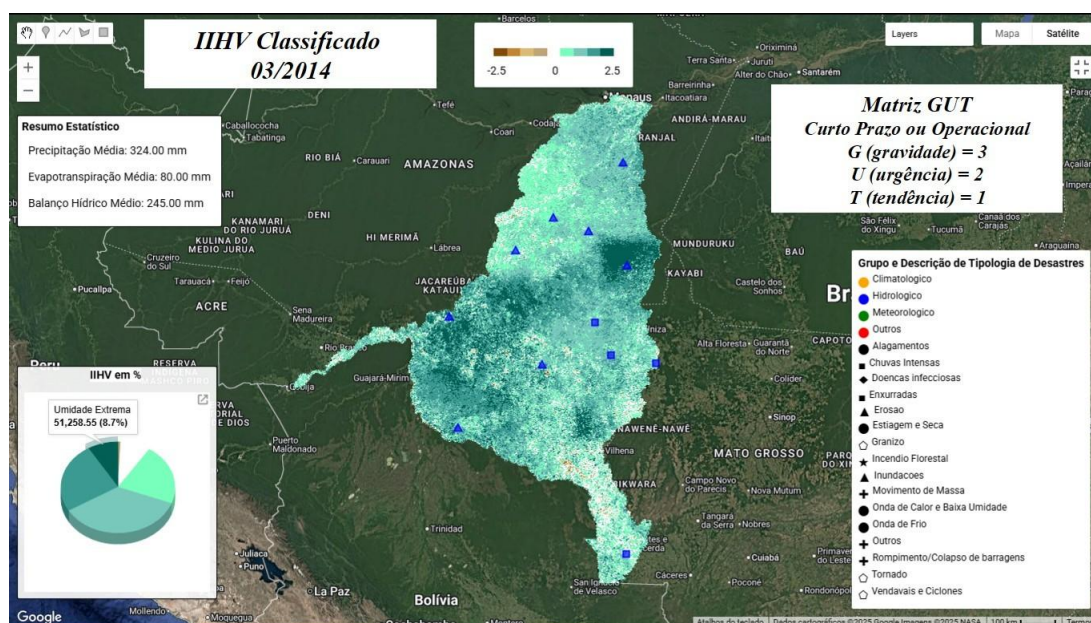
Figura 31 – IIHV: Março de 2014 na Mesorregião Hidrográfica do Rio Madeira Matriz GUT de médio prazo: G2-U3-T1



Fonte: Elaborado pelo autor.

2. **Cenário G3-U2-T1 (Figura 32):** Ao inverter a lógica e priorizar a Vegetação (Gravidade), observa-se uma subestimação drástica do evento. A área de “Umidade Extrema” cai para apenas 8,7%. Isso ocorre porque a resposta da vegetação é heterogênea e saturada; dar peso 3 a este componente “dilui” o sinal de alerta meteorológico, mascarando a gravidade da cheia real.

Figura 32 – IIHV: Março de 2014 na Mesorregião Hidrográfica do Rio Madeira Matriz GUT de médio prazo: G3-U2-T1



Fonte: Elaborado pelo autor.

3. **Cenário Base G1-U2-T3:** Demonstrou ser o equilíbrio ideal. Ao manter a Vegetação com peso 1 (atuando como validador, não como condutor) e priorizar as forçantes climáticas (T3 e U2), o índice capturou a magnitude do evento (49,4%) sem os exageros do pluviômetro isolado nem a cegueira da inércia biológica.

4.3.2 Setembro de 2023

A aplicação da análise de sensibilidade ao evento de seca extrema de setembro de 2023 (Tabela 9) expõe a natureza termicamente induzida deste desastre e reforça a importância do peso atribuído à Tendência (SPEI).

Diferentemente do evento de 2014, onde as forçantes climáticas atuaram em uníssono, em 2023 observa-se uma divergência crítica. A configuração base (**G1-U2-T3**) foi a única capaz de capturar a real dimensão da “Seca Extrema” (35,9%), pois atribuiu peso máximo ao componente que incorporava a temperatura (T). Ao deslocar o peso principal para a precipitação (Urgência) ou para a vegetação (Gravidade), o índice colapsou, mascarando a severidade da crise.

Tabela 9 – Comparação da área de "Seca Extrema" em setembro de 2023 sob diferentes configurações da Matriz GUT

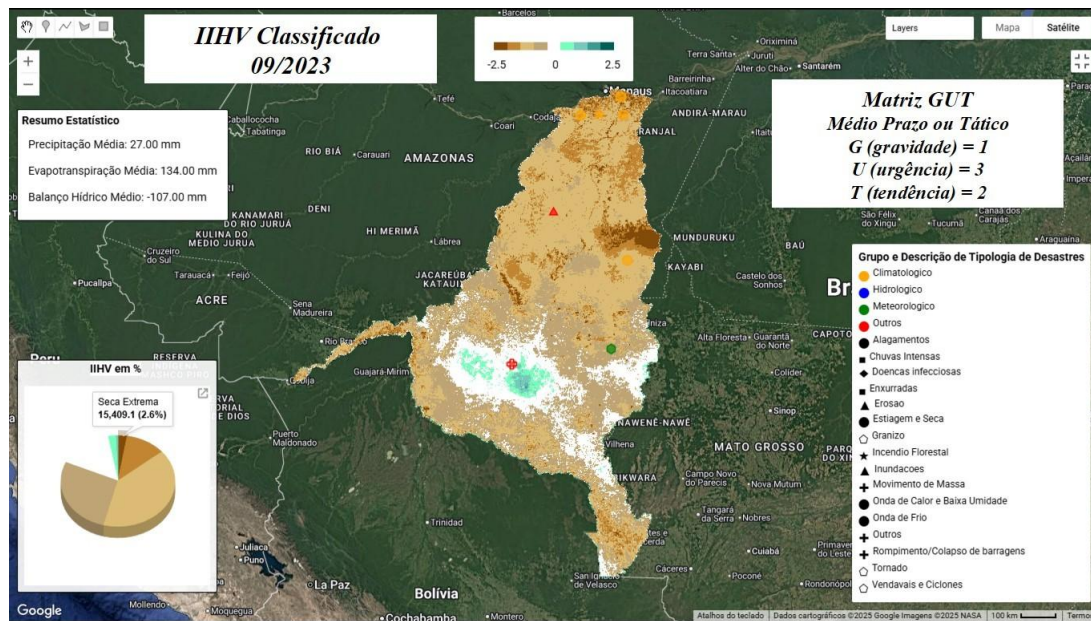
Configuração	Foco Principal	Área Seca Extrema (km²)	% da Bacia
G1-U2-T3	Clima/Tendência (Base)	212.738,02	35,9%
G1-U3-T2	Precipitação (Urgência)	15.409,1	2,6%
G2-U3-T1	Intermediário	4.655,24	0,8%
G3-U2-T1	Vegetação (Gravidade)	10.062,71	1,7%

Fonte: Elaborado pelo autor.

A análise espacial dos cenários ilustra os riscos de uma calibração inadequada para secas na Amazônia:

1. **Cenário Base G1-U2-T3 (Figura 22):** Ao priorizar a Tendência (Peso 3), o índice capturou o efeito devastador das altas temperaturas sobre o balanço hídrico, identificando corretamente a extensão da seca extrema (tons de marrom escuro). Esta configuração provou ser a mais segura para detectar secas impulsionadas pelo El Niño.
2. **Cenário G1-U3-T2 (Figura 33):** Ao focar na Precipitação (Urgência), a área de seca extrema caiu drasticamente para 2,6%. Isso demonstra que, em 2023, a falta de chuva (SPI) foi menos determinante que a evapotranspiração (SPEI). Um monitoramento focado apenas em chuva teria subestimado o risco de incêndios e colapso hídrico.

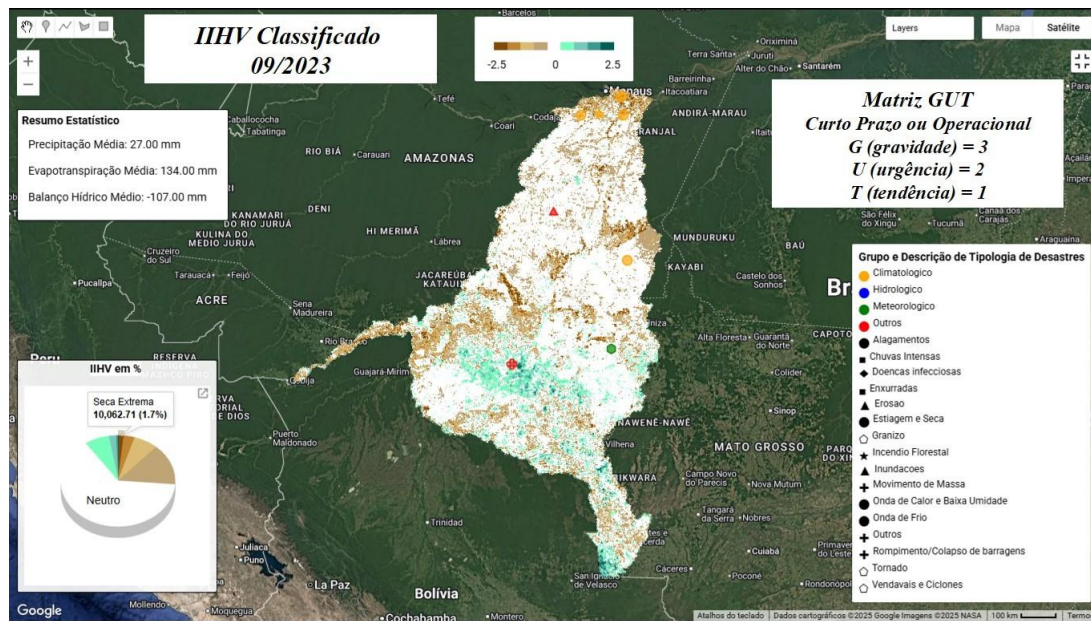
Figura 33 – IIHV: Setembro de 2023 na Mesorregião Hidrográfica do Rio Madeira Matriz GUT de médio prazo: G1-U3-T2



Fonte: Elaborado pelo autor.

3. **Cenário G3-U2-T1 (Figura 34):** Este cenário apresenta o segundo resultado mais alarmante do ponto de vista da gestão de riscos: **a quase que invisibilidade total do evento**. Ao dar peso 3 à Vegetação (que ainda estava verde devido à inércia biológica), a seca extrema virtualmente quase que desapareceu do mapa (1,7%). Isso confirma definitivamente que a dimensão Gravidade deve ter peso mínimo (1) em sistemas de alerta precoce, servindo apenas para modular, e não conduzir, o índice final.

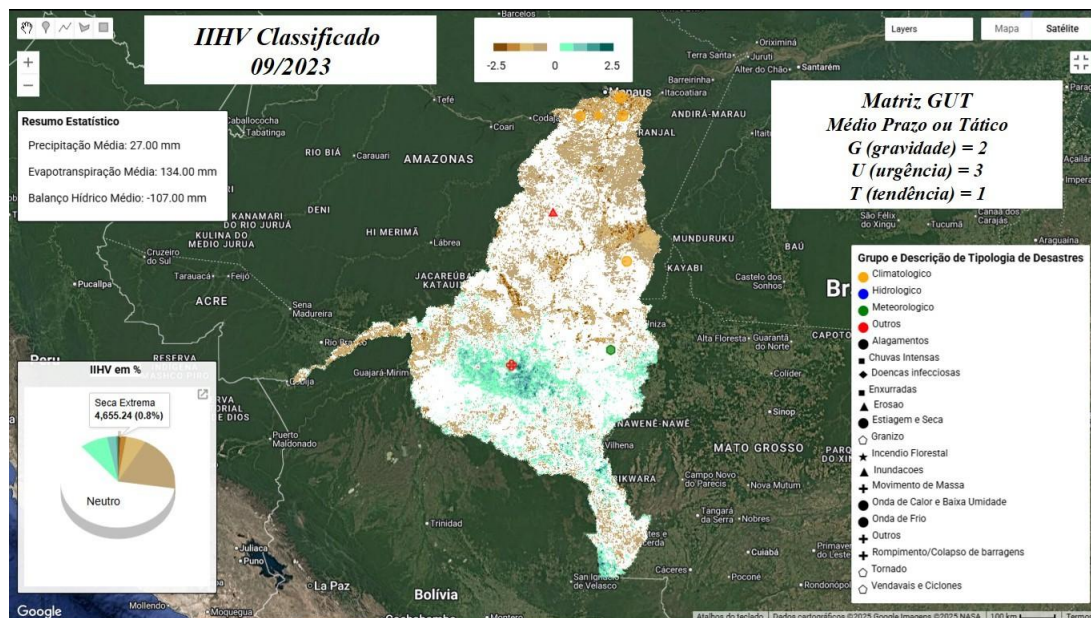
Figura 34 – IIHV: Setembro de 2023 na Mesorregião Hidrográfica do Rio Madeira Matriz GUT de médio prazo: G3-U2-T1



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para fins de registro espacial da sensibilidade intermediária, apresenta-se também o cenário G2-U3-T1, que igualmente falhou em capturar a magnitude do evento.

Figura 35 – IIHV: Setembro de 2023 na Mesorregião Hidrográfica do Rio Madeira Matriz GUT de médio prazo: G2-U3-T1



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.4 Discussão dos resultados

A validação do Índice Integrado de Hidrometeorologia e Vegetação (IIHV) através da análise de dois eventos extremos e antitéticos — a cheia histórica de 2014 e a seca severa de 2023 — demonstrou a robustez e a flexibilidade da ferramenta como um sistema de monitoramento e alerta precoce para a Bacia do Rio Madeira. A discussão dos resultados obtidos revela não apenas a capacidade do índice em diagnosticar a intensidade dos fenômenos, mas também em capturar as nuances de suas dinâmicas físicas e os descompassos temporais entre o gatilho climático e o impacto socioambiental.

O primeiro ponto fundamental da análise reside na **dualidade de resposta do IIHV**. Durante a cheia de 2014, o índice refletiu um evento de “saturação atmosférica”, onde as forçantes climáticas (SPI e SPEI) atuaram em uníssono, gerando um sinal de umidade extrema generalizado e homogêneo. Neste cenário, a vegetação (EVI e NDMI), embora com menor peso na Matriz GUT (G1), atuou como um confirmador da saturação hídrica da paisagem, com sua resposta positiva (maior verdor e conteúdo de água) amplificando o sinal de alerta. A correlação direta entre a área classificada como “Umidade Extrema” (49,4%) e os registros de desastres por “Inundação” no S2ID validou a eficácia do índice em eventos de excesso hídrico.

Em contrapartida, a seca de 2023 expôs uma dinâmica mais complexa, a de uma “seca relâmpago” (flash drought) termicamente induzida. A divergência entre o SPI (que mostrava irregularidade na falta de chuva) e o SPEI (que indicava um colapso generalizado do balanço hídrico devido às altas temperaturas) foi o achado mais crítico. Este fato, por si só, justifica a incorporação do SPEI como componente de “Tendência” com peso máximo (T3). A análise de sensibilidade foi categórica ao demonstrar que configurações da Matriz GUT que não priorizavam o SPEI teriam tornado o evento de 2023 praticamente invisível, subestimando drasticamente o risco. A configuração G1-U2-T3 provou ser a única capaz de capturar a real magnitude da seca extrema (35,9%), ao ponderar adequadamente o papel da evapotranspiração.

O segundo ponto crucial reside na confirmação da inércia biológica e da histerese socioeconômica. A persistência de áreas neutras nos mapas do IIHV durante o pico da seca de 2023 evidencia a **Inércia Biológica (ou time-lag)** da floresta densa. Através de sistemas radiculares profundos, a vegetação amazônica mantém o turgor foliar mesmo sob estresse hídrico severo, o que tende a mascarar o desastre real em monitoramentos baseados exclusivamente em índices de vegetação como o NDVI ou EVI. A calibração da Matriz GUT para Gravidade igual a 1 foi, portanto, uma decisão estratégica de **blindagem metodológica**: ela permitiu que a ‘sede’ climática (*SPEI/SPI*) conduzisse o diagnóstico, utilizando a vegetação apenas como um validador de superfície. Isso evitou que a resiliência momentânea da floresta gerasse um ‘falso negativo’ para a gestão de riscos, sinalizando a crise meses antes da materialização dos prejuízos reportados no S2ID.

A análise de sensibilidade da Matriz GUT consolidou a escolha da parametrização G1-U2-T3 como a mais segura e equilibrada para a Bacia Amazônica. Ficou evidente que priorizar a

precipitação (Urgência) pode levar a superestimações em eventos de cheia, enquanto priorizar a vegetação (Gravidade) resulta em uma perigosa subestimação de ambos os tipos de eventos, mascarando os sinais de alerta. A configuração adotada, que prioriza a tendência climática (SPEI), confere peso secundário ao gatilho imediato (SPI) e utiliza a vegetação como um modulador de fundo, representa um avanço conceitual para o monitoramento de uma região onde os extremos são cada vez mais influenciados por anomalias de temperatura.

É fundamental ressaltar que o ajuste de pesos, embora passível de interpretação como viés estatístico, deve ser compreendido como uma *Calibração Contextual*. No contexto da gestão de riscos na Amazônia, a rigidez de um modelo único pode ignorar especificidades locais. O IIHV resolve essa limitação ao transformar dados ambientais brutos em indicadores de priorização de problemas (**prioritization of action**), alinhando a precisão das Geociências com os protocolos operacionais da Defesa Civil (Kepner; Tregoe, 1965).

Finalmente, a integração dos resultados do IIHV com os dados do S2ID não apenas validou o índice, mas também enriqueceu a compreensão dos próprios desastres. A distinção entre os tipos de desastre (Inundação vs. Estiagem), a localização dos municípios mais afetados e a caracterização dos prejuízos (Público vs. Privado) alinharam-se de forma consistente com os padrões espaciais e temporais gerados pelo IIHV. Essa sinergia entre o produto de sensoriamento remoto e os registros de campo reforça o potencial do IIHV como uma ferramenta operacional para a gestão de riscos, permitindo que órgãos de Defesa Civil e agências de gestão de recursos hídricos passem de uma postura reativa para uma abordagem proativa, baseada em evidências científicas e alertas antecipados.

5 PRODUTO TÉCNICO

Este capítulo dedica-se à apresentação do produto técnico-científico desenvolvido no âmbito deste Mestrado Profissional, atendendo aos requisitos da CAPES para a produção de soluções tecnológicas aplicáveis à gestão de riscos e desastres. O produto consiste em uma aplicação web interativa, denominada **Plataforma de Monitoramento IIHV**, para a análise e visualização do Índice Integrado de Hidrometeorologia e Vegetação (IIHV) em toda a série histórica de 2003 a 2023 para as mesorregiões hidrográficas da Amazônia.

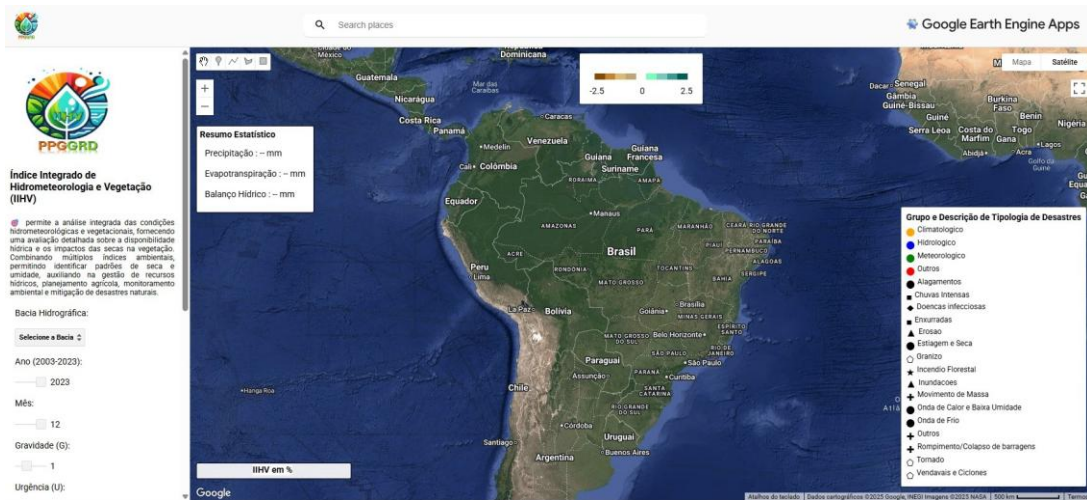
5.1 Plataforma de desenvolvimento

O aplicativo foi integralmente desenvolvido na plataforma **Google Earth Engine (GEE)**, uma escolha estratégica que viabilizou o projeto. O GEE é um ambiente de computação em nuvem que oferece acesso a um vasto catálogo de dados de sensoriamento remoto e capacidade de processamento geoespacial em escala planetária. A utilização desta plataforma eliminou a necessidade de downloads massivos de dados e de infraestrutura computacional local de alto desempenho, permitindo que todos os cálculos, desde a climatologia histórica até a geração dos mapas e gráficos, sejam executados em tempo real nos servidores do Google. Isso garante que a ferramenta seja leve, rápida e acessível a qualquer usuário com uma conexão à internet, democratizando o acesso à informação geoespacial complexa.

5.2 Descrição e funcionalidades

A interface da aplicação foi projetada para ser intuitiva, permitindo que tanto especialistas quanto gestores sem formação em geoprocessamento possam extrair informações valiosas. A tela principal (Figura 36) é dividida em um painel de controle à esquerda e uma área de visualização de mapas à direita.

Figura 36 – Interface de Usuário da Aplicação IIHV via Google Earth Engine (GEE)



Fonte: Elaborado pelo autor.

As principais funcionalidades incluem:

1. **Controle Espacial e Temporal:** O usuário pode selecionar a mesorregião hidrográfica de interesse e navegar por toda a série histórica, de janeiro de 2003 a dezembro de 2023, por meio de seletores de ano e mês. Essa funcionalidade permite a análise de eventos passados e a reconstrução de suas cronologias.
2. **Análise de Sensibilidade da Matriz GUT:** Um dos recursos mais poderosos da ferramenta é a capacidade de o usuário ajustar dinamicamente os pesos da **Gravidade (G)**, **Urgência (U)** e **Tendência (T)** por meio de barras deslizantes. Ao clicar em “Atualizar IIHV”, o índice é recalculado instantaneamente, permitindo a realização de análises de sensibilidade em tempo real para entender como a priorização de diferentes componentes (vegetação, precipitação ou balanço hídrico) altera o diagnóstico do evento.
3. **Visualização Multicamada:** A aplicação permite a visualização de múltiplas camadas de dados, incluindo:
 - O **IIHV classificado** final, com uma paleta de cores intuitiva que vai do marrom (seca extrema) ao verde-escuro (umidade extrema).
 - Os **índices componentes padronizados**, como o SPI-2, SPEI-3, EVI-P e NDMI-P, possibilitando uma análise desagregada para entender os fatores que conduzem o resultado do IIHV.
4. **Painel de Estatísticas e Gráficos:** Para cada visualização, a plataforma gera automaticamente um resumo estatístico e um gráfico de pizza no canto inferior esquerdo. Este painel quantifica a área (em km²) e a porcentagem do território ocupada por cada classe do IIHV, oferecendo uma métrica objetiva para dimensionar a magnitude de um evento de seca ou cheia.

5. **Integração com Dados de Desastres:** A ferramenta sobrepõe os registros de desastres do S2ID, permitindo uma validação espacial imediata entre as áreas apontadas como críticas pelo IIHV e os locais onde os desastres foram oficialmente reportados.

5.3 Arquitetura e fontes de dados

O código-fonte da aplicação, escrito em JavaScript, orquestra o acesso e processamento de diversos conjuntos de dados geoespaciais disponíveis no catálogo do GEE:

- **Precipitação e Evapotranspiração Potencial:** Utiliza o produto TERRACLIMATE, que fornece dados mensais com resolução espacial de aproximadamente 4 km, para o cálculo do balanço hídrico e dos índices SPI e SPEI.
- **Índices de Vegetação:** Emprega o produto MODIS/061/MOD13A3, com resolução de 1 km, para extrair as séries temporais de NDVI e EVI. O NDMI é calculado em tempo de execução a partir das bandas de reflectância do infravermelho próximo (NIR) e ondas curtas (SWIR) do mesmo produto.
- **Limites Geográficos:** As mesorregiões hidrográficas são carregadas a partir de um *asset* vetorial (SNIRH_BHN250_mesoRH_Norte_organizado) previamente organizado e importado para o ambiente do GEE.
- **Dados de Desastres:** Os pontos de ocorrência de desastres são carregados de outro *asset* vetorial (S2ID_UFPA_PPGGRD_Organizado).

O fluxo de processamento segue a metodologia descrita nesta dissertação: para uma data e local selecionados, o sistema busca a série histórica de 30 anos, calcula as anomalias padronizadas para cada um dos quatro indicadores, integra-os por meio da Matriz GUT com os pesos definidos pelo usuário e, por fim, classifica e exibe o mapa resultante e as estatísticas associadas.

5.4 Acesso e disponibilidade

Em conformidade com os princípios da ciência aberta e os objetivos de um mestrado profissional, o produto técnico encontra-se registrado e disponível para acesso público e gratuito, garantindo sua total transparência, replicabilidade e uso por gestores públicos, pesquisadores e pela sociedade civil.

- **Link da Aplicação:** <https://carvalhovaldo09.users.earthengine.app/view/iihv-ppggrd-ig-ufpa>
- **Documentação e Manual:** <https://iihv-ppggrd-ig-ufpa.streamlit.app/>

5.5 Impacto e aplicabilidade

A ferramenta foi desenhada para dar suporte direto à tomada de decisão em diferentes fases do ciclo de gestão de riscos. Seu impacto potencial reside na capacidade de traduzir dados complexos de satélite em informações acionáveis, com aplicabilidade direta para diversas instituições:

- **Defesa Civil (Municipal, Estadual e Nacional):** A plataforma pode ser utilizada como um sistema de monitoramento e alerta precoce. Ao acompanhar a evolução do IIHV no início da estação seca, por exemplo, é possível identificar a emergência de uma *flash drought* (seca relâmpago) semanas ou meses antes que seus impactos na agricultura e no abastecimento de água se tornem críticos. As estatísticas de área afetada permitem dimensionar a escala do evento e direcionar recursos de forma mais eficaz, subsidiando a decretação de situação de emergência com base em dados objetivos.
- **Agência Nacional de Águas (ANA) e Órgãos Gestores de Recursos Hídricos:** O monitoramento do IIHV em bacias hidrográficas de interesse para a geração hidrelétrica ou para a navegação, como a do Rio Madeira, fornece um indicador antecedente das condições de vazão. A análise da tendência do IIHV pode auxiliar no planejamento da operação de reservatórios e na emissão de alertas para restrições de navegabilidade.
- **Secretarias de Meio Ambiente e Agricultura:** A ferramenta permite identificar áreas com alto estresse na vegetação, correlacionando-as com o risco de incêndios florestais ou com perdas de produtividade agrícola. O IIHV funciona como um indicador da “saúde” do ecossistema, permitindo o planejamento de ações de fiscalização e o apoio a produtores rurais em regiões vulneráveis.
- **Pesquisadores e Academia:** A flexibilidade da Matriz GUT e o acesso à série histórica completa transformam a aplicação em um laboratório virtual para o estudo de eventos extremos, permitindo testar hipóteses sobre as interações entre clima, hidrologia e vegetação na Amazônia.

Em suma, o produto técnico transcende um simples visualizador de mapas, consolidando-se como uma plataforma analítica robusta que converte dados de satélite em inteligência territorial, com o potencial de fortalecer a resiliência da Amazônia frente aos desafios impostos pelas mudanças climáticas.

5.6 Alinhamento com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS)

A Plataforma de Monitoramento IIHV está diretamente alinhada com os esforços globais para um futuro mais sustentável, contribuindo para várias metas estabelecidas pelos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU).

- **ODS 6 - Água Potável e Saneamento:** Ao fornecer diagnósticos precisos sobre a disponibilidade hídrica e a severidade das secas, o aplicativo contribui diretamente para a gestão integrada e sustentável dos recursos hídricos (Meta 6.5). A capacidade de antecipar crises hídricas é fundamental para garantir a segurança hídrica e o acesso à água, especialmente para comunidades vulneráveis em períodos de estiagem.
- **ODS 13 - Ação Contra a Mudança Global do Clima:** A ferramenta é uma resposta direta à necessidade de fortalecer a resiliência e a capacidade de adaptação aos riscos relacionados ao clima e às catástrofes naturais (Meta 13.1). O monitoramento de secas e cheias, eventos extremos cuja frequência e intensidade são exacerbadas pelas mudanças climáticas, melhora o planejamento e a emissão de alertas precoces, sendo um pilar para a adaptação climática na Amazônia.
- **ODS 15 - Vida Terrestre:** O IIHV, ao integrar a resposta da vegetação (EVI e NDMI), serve como um indicador da saúde dos ecossistemas terrestres. A plataforma ajuda a monitorar o impacto das secas na floresta amazônica, identificando áreas de estresse vegetal que podem estar mais suscetíveis a incêndios florestais e degradação. Dessa forma, a ferramenta apoia a conservação e o uso sustentável dos ecossistemas terrestres (Meta 15.1) e o combate à desertificação (Meta 15.3).

Dessa forma, o produto técnico não apenas atende às necessidades locais de gestão de riscos, mas também se insere na agenda global de sustentabilidade, oferecendo uma solução tecnológica que promove a resiliência climática e a proteção ambiental.

6 CONCLUSÃO

Este trabalho propôs-se a desenvolver, validar e demonstrar a eficácia do Índice Integrado de Hidrometeorologia e Vegetação (IIHV) como uma ferramenta operacional para o monitoramento de eventos hidrometeorológicos extremos na Amazônia, com foco na Mesorregião Hidrográfica do Rio Madeira. A problemática central que norteou a pesquisa foi a crescente necessidade de superar a complexidade e a incerteza na interpretação de múltiplos indicadores ambientais, oferecendo aos gestores uma métrica unificada, robusta e de fácil compreensão. A conclusão desta dissertação retoma os objetivos traçados, sintetiza os principais achados e delineia os caminhos futuros para a aplicação e o aprimoramento do índice.

6.1 Considerações finais

O objetivo geral de validar o IIHV foi plenamente alcançado através da análise aprofundada de dois eventos antitéticos e de grande magnitude: a cheia histórica de 2014 e a seca severa de 2023. A pesquisa demonstrou que o índice não apenas caracterizou com sucesso ambos os extremos, mas também capturou as nuances de suas distintas dinâmicas físicas, respondendo de forma coerente tanto a um evento de saturação hídrica por excesso de chuvas quanto a uma seca relâmpago termicamente induzida.

Os objetivos específicos foram sistematicamente atendidos. A implementação da metodologia no Google Earth Engine (GEE) provou ser uma escolha acertada, viabilizando o processamento de uma série histórica de 30 anos e a integração de múltiplos datasets (TerraClimate e MODIS) em uma plataforma de nuvem acessível e de alto desempenho. A correlação entre os mapas do IIHV e os registros de desastres do S2ID foi um pilar da validação, confirmando que as áreas de maior severidade indicadas pelo índice coincidiam espacial e temporalmente com os impactos socioeconômicos documentados, como inundações e perdas na agricultura.

A análise de sensibilidade da Matriz GUT (Gravidade, Urgência e Tendência) representou uma das contribuições científicas mais relevantes deste trabalho. A calibração final, que atribuiu maior peso à Tendência (SPEI), peso intermediário à Urgência (SPI) e menor peso à Gravidade (índices de vegetação), mostrou-se crucial. Ficou evidente que, para as secas amazônicas modernas, a temperatura e a evapotranspiração (contempladas no SPEI) são fatores mais determinantes que a ausência de chuva isoladamente. Uma configuração que não priorizasse a Tendência teria tornado a seca de 2023 perigosamente invisível. Ao mesmo tempo, a manutenção da vegetação como um componente de menor peso evitou que a inércia biológica da floresta mascarasse os sinais de alerta precoce emitidos pela atmosfera.

O desenvolvimento do aplicativo web interativo, o produto técnico desta dissertação, materializou a transição da teoria para a prática. A ferramenta não é apenas um visualizador de mapas, mas uma plataforma analítica que permite a exploração de dados, a realização de

análises de sensibilidade e a quantificação de áreas afetadas, cumprindo o objetivo de fornecer suporte técnico à gestão de recursos hídricos e mitigação de desastres. Sua disponibilização pública, juntamente com a documentação detalhada, assegura a transparência, a replicabilidade e o potencial de apropriação por diferentes instituições.

Contudo, reconhecem-se as limitações inerentes ao método. A qualidade dos dados de sensoriamento remoto, embora robusta, pode ser afetada pela cobertura de nuvens, especialmente durante a estação chuvosa, o que pode introduzir ruídos nos índices de vegetação. A resolução espacial dos dados (1 km para vegetação e 4 km para clima) é adequada para análises regionais, mas pode não capturar fenômenos de microescala. Por fim, a climatologia de referência (1993-2023), embora longa, opera sob um clima já em transformação, e a definição de “normalidade” pode necessitar de reavaliações futuras.

Apesar dessas limitações, o IIHV demonstrou ser um avanço significativo. Ele responde à problemática inicial ao oferecer uma síntese poderosa que traduz a complexidade hidrometeorológica da Amazônia em uma métrica acionável, fortalecendo a capacidade de diagnóstico e, consequentemente, a resiliência da região frente aos desafios climáticos.

Por fim, é imperativo reforçar o enquadramento operacional do Índice Integrado de Hidrometeorologia e Vegetação (IIHV). Diferente de sistemas de alerta precoce (*Early Warning Systems*) genéricos, o IIHV consolida-se nesta pesquisa como uma ferramenta de Diagnóstico e Monitoramento Regional, cujos pesos e janelas temporais foram estrategicamente calibrados para as especificidades hidrológicas e ecofisiológicas da Mesorregião do Rio Madeira. Portanto, sua aplicação em outros biomas ou bacias hidrográficas com dinâmicas distintas exige uma recalibração prévia da Matriz GUT. Para a gestão de desastres na Amazônia, o índice demonstrou ser um instrumento robusto de suporte à decisão, permite que a Defesa Civil identifique a severidade real dos eventos através da convergência de evidências climáticas e biológicas, superando as limitações dos indicadores fragmentados.

6.2 Perspectivas futuras

O potencial do Índice Integrado de Hidrometeorologia e Vegetação (IIHV) e de sua plataforma de monitoramento estende-se para além dos resultados apresentados nesta dissertação. As perspectivas futuras podem ser divididas em duas frentes: recomendações para implementação institucional e sugestões para a continuidade da pesquisa acadêmica.

Para Implementação Institucional:

1. **Protocolos de Alerta na Defesa Civil:** Recomenda-se que as Secretarias de Proteção e Defesa Civil (municipais, estaduais e nacional) integrem a Plataforma IIHV em suas salas de situação. Sugere-se a criação de um protocolo operacional onde, ao se atingir um limiar pré-definido (ex: $\text{IIHV} < -1.5$ em 10% de um município), um estado de pré-alerta seja automaticamente emitido, desencadeando ações preventivas como a preparação de planos de contingência e a comunicação com comunidades vulneráveis.

2. **Suporte à Gestão de Recursos Hídricos:** A Agência Nacional de Águas (ANA) e os comitês de bacia podem utilizar o IIHV como um indicador antecedente para o planejamento da operação de reservatórios e para a gestão da navegabilidade. A tendência de queda do IIHV no início da estação seca pode servir de base para a emissão de alertas de restrição de calado com maior antecedência.
3. **Fiscalização Ambiental e Prevenção de Incêndios:** Secretarias de Meio Ambiente podem cruzar os mapas de IIHV com dados de focos de calor. Áreas com valores de IIHV extremamente negativos representam vegetação sob alto estresse hídrico e, portanto, com maior risco de ignição e propagação de incêndios. Isso permite o direcionamento de equipes de fiscalização e brigadistas para as zonas mais críticas.

Para Continuidade da Pesquisa:

1. **Expansão e Calibração para Outras Bacias:** A metodologia do IIHV deve ser expandida e calibrada para outras bacias hidrográficas estratégicas da Amazônia, como as dos rios Tapajós, Xingu e Negro, ajustando os pesos da Matriz GUT conforme as particularidades de cada região.
2. **Assimilação de Dados *In Situ*:** Uma evolução natural do índice seria a assimilação de dados de estações telemétricas em tempo real (nível de rios, umidade do solo). Isso permitiria uma calibração dinâmica e uma validação ainda mais robusta do índice, combinando a abrangência espacial dos satélites com a precisão pontual das medições de campo.
3. **Desenvolvimento de Modelos Preditivos:** A série histórica de 20 anos do IIHV constitui um valioso conjunto de dados de treinamento para modelos de inteligência artificial. Sugere-se o desenvolvimento de modelos (ex., redes neurais recorrentes - LSTM) capazes de *prever* o comportamento do IIHV com semanas ou meses de antecedência, transformando a ferramenta de um sistema de monitoramento para um sistema de prognóstico.
4. **Aumento da Resolução Espacial (Downscaling):** Pesquisas futuras podem explorar técnicas de *downscaling* estatístico, utilizando dados de satélites de maior resolução (ex. Sentinel, Landsat) para refinar a escala do IIHV, tornando-o aplicável para a gestão de precisão em nível de propriedade rural ou de pequenas sub-bacias.

Ao seguir por estes caminhos, o IIHV pode consolidar-se não apenas como um produto acadêmico, mas como um pilar para a construção de um sistema de monitoramento e alerta de desastres mais inteligente, integrado e resiliente para a Amazônia, alinhando a ciência de ponta com as necessidades urgentes da sociedade.

REFERÊNCIAS

ABATZOGLOU, John T. *et al.* TerraClimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958–2015. **Scientific Data**, v. 5, n. 1, p. 170191, 2018.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO-ANA. **Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil: informe anual 2023**. Brasília,DF: ANA, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/monitoramento-e-eventos-criticos/eventoscriticos/seca-2023>. Acesso em: 20 fev. 2025.

BRASIL. Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil-SEDEC. **Sistema integrado de informações sobre desastre (S2ID): registros de desastres hidrometeorológicos — Bacia do Rio Madeira**, 2014. SEDEC. Disponível em: <https://s2id.mi.gov.br>, 2014. Acesso em: 20 fev. 2025.

BRASIL. Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil-SEDEC. **Sistema integrado de informações sobre desastres (S2ID): registros de desastres hidrometeorológicos — Bacia do Rio Madeira**, 2023. SEDEC. Disponível em: <https://s2id.mi.gov.br>, 2023. Acesso em: 25 mar. 2025.

DIDAN, Kamel. **MOD13A3 MODIS/Terra Vegetation Indices Monthly L3 Global 1km SIN Grid V061**. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. Disponível em: <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD13A3.061>; NASA EOSDIS Land Processes DAAC, 2021.

ESPINOZA, Jhan Carlo *et al.* The extreme 2014 flood in south-western Amazon basin: the role of tropical-subtropical South Atlantic SST gradient. **Environmental Research Letters**, v. 9, n. 12, e 124007, 2014.

FELDPAUSCH, Ted R. *et al.* Tree height integrated into pantropical forest biomass estimates. **Biogeosciences**, v. 9, n. 8, p. 3381–3403, 2012.

GAO, Bo-Cai. NDWI—a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. **Remote Sensing of Environment**, v. 58, n. 3, p. 257–266, 1996.

GORELICK, Noel *et al.* Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. **Remote Sensing of Environment**, v. 202, p. 18–27, 2017.

HUETE, Alfredo *et al.* A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. **Remote Sensing of Environment**, v. 59, n. 3, p. 440–451, 1997.

JENSEN, John R. **Remote Sensing of the Environment: an earth resource perspective**. 2. ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson Education, 2017.

KEPNER, Charles H.; TREGOE, Benjamin B. **The Rational Manager: a systematic approach to problem solving and decision making**. 1st. ed. New York: McGraw-Hill, 1965.

KOGAN, Felix N. Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection. **Advances in Space Research**, v. 15, n. 11, p. 91–100, 1995.

LOVEJOY, Thomas E.; NOBRE, Carlos. Amazon tipping point. **Science Advances**, v. 4, n. 2, p. eaat2340, 2018.

MAKARIEVA, Anastassia M.; GORSHKOV, Victor G. Biotic pump of atmospheric moisture as driver of the hydrological cycle on land. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 11, n. 2, p. 1013–1033, 2007.

MARENGO, José A.; ESPINOZA, Jhan Carlo. Extreme seasonal droughts and floods in Amazonia: causes, trends and impacts. **International Journal of Climatology**, v. 36, n. 3, p. 1033–1050, 2016.

MCKEE, Thomas B.; DOESKEN, Nolan J.; KLEIST, John. The relationship of drought frequency and duration to time scales. *In*: CONFERENCE ON APPLIED CLIMATOLOGY, 8th, 1993, Anaheim, California. Proceedings[...]. Anaheim, California: American Meteorological Society, 1993.

NOBRE, Carlos A.; SAMPAIO, Gilvan; SALAZAR, Luis F. Mudanças climáticas e Amazônia. **Ciência e Cultura**, v. 59, n. 3, p. 22–27, 2007.

PEREIRA, Rafael H. M.; GONCALVES, Caio Nogueira. **geobr**: Download Shapefiles of Official Spatial Data Sets of Brazil. [*S. l.*] : Python Package Index (PyPI), 2029. Disponível em: <https://pypi.org/project/geobr/>. Acesso em: 12 fev. 2025.

SVOBODA, Mark *et al.* The Drought Monitor. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 83, n. 8, p. 1181–1190, 2002.

VICENTE-SERRANO, Sergio M.; BEGUERÍA, Santiago; LÓPEZ-MORENO, Juan I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. **Journal of Climate**, v. 23, n. 7, p. 1696–1718, 2010.

WALLACE, John M.; GUTZLER, David S. Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter. **Monthly Weather Review**, v. 109, n. 4, p. 784–812, 1981.

YOON, Jin-Ho; ZENG, Ning. An Atlantic influence on Amazon rainfall. **Climate Dynamics**, v. 34, n. 2-3, p. 249–264, 2010.

ZARGAR, Amin *et al.* A review of drought indices. **Environmental Reviews**, v. 19, p. 333–349, 2011.

APÊNDICE A – CÓDIGO FONTE DO APLICATIVO IIHV (GOOGLE EARTH ENGINE)

O código a seguir apresenta a implementação completa do Índice Integrado de Hidrometeorologia e Vegetação (IIHV) na plataforma Google Earth Engine, desenvolvido em linguagem JavaScript pelo autor.

```

1  /* *****
2  *  INDICE INTEGRADO DE HIDROMETEOROLOGIA E VEGETACAO (IIHV)
3  *  Aplicativo Google Earth Engine
4  *
5  *  Autor: Elivaldo Carvalho Rocha
6  *  Programa: PPGGRD-IG-UFPA
7  *  Orientador: Prof. Dr. Joao de Athaydes Silva Junior
8  *  Coorientador: Prof. Dr. Everaldo Barreiros de Souza
9  *  ***** */
10
11 /* *****
12 *  MODULOS / FUNCOES AUXILIARES
13 *  ***** */
14
15 /**
16 *  1) Retorna a ROI (Regiao de Interesse) a partir de um FeatureCollection e do
17 *  nome da mesorregiao.
18 *  @param {ee.FeatureCollection} featureCollection - Colecao de features (mesoRH
19 *  ).
20 *  @param {String} mesoNome - Nome da mesorregiao.
21 *  @return {ee.FeatureCollection} ROI filtrada.
22 */
23 function getROI(featureCollection, mesoNome) {
24     var roi = featureCollection.filter(ee.Filter.eq("nm\\_mesoRH", mesoNome));
25     var size = roi.size().getInfo();
26
27     if (size === 0) {
28         print('Erro: Mesorregiao "' + mesoNome + '" nao encontrada. Verifique o nome
29         e tente novamente.');
```

```

43
44 /**
45  * 3) Recorta e aplica fator de escala nas bandas NDVI, EVI, sur\\_refl\\_b02 e
    sur\\_refl\\_b07 do MOD13A3.
46  * @param {ee.Image} image - Imagem MOD13A3 original.
47  * @param {ee.FeatureCollection|ee.Geometry} region - Regiao de interesse para
    recorte.
48  * @return {ee.Image} Imagem com bandas escalonadas e recortadas.
49  */
50
51 var name\\_NDVI = "NDVI";
52 var name\\_EVI = "EVI";
53 var name\\_NDMI = "NDMI";
54 var name\\_NIR = 'sur\\_refl\\_b02';
55 var name\\_SWIR = 'sur\\_refl\\_b07';
56
57 function clipAndScale(image, region) {
58   var clippedImage = image.clip(region);
59   var scaleFactor = 0.0001;
60   var scaledImage = clippedImage
61     .select([name\\_NDVI, name\\_EVI, name\\_NIR, name\\_SWIR])
62     .multiply(scaleFactor);
63   return clippedImage
64     .addBands(scaledImage, null, true)
65     .copyProperties(image, image.propertyNames());
66 }
67
68 /**
69  * 4) Calcula NDMI a partir de sur\\_refl\\_b02 (NIR) e sur\\_refl\\_b07 (SWIR).
70  * @param {ee.Image} image - Imagem de entrada.
71  * @return {ee.Image} Imagem com banda "NDMI" adicionada.
72  */
73
74
75 function calculateNDMI(image) {
76   var ndmi = image
77     .normalizedDifference([name\\_NIR, name\\_SWIR])
78     .rename('NDMI');
79   return image
80     .addBands(ndmi)
81     .copyProperties(image, image.propertyNames())
82     .set("NDMI\\_calculated", true);
83 }
84
85 /**
86  * 5) Cria colecao de Balanco Hidrico (WB = P - PET) para cada mes em um
    intervalo de anos.
87  * @param {ee.ImageCollection} precipitation - Colecao de precipitacao (CHIRPS).
88  * @param {ee.ImageCollection} pet - Colecao de evapotranspiracao (MOD16A2GF).
89  * @param {Array} years - Lista de anos a serem considerados.
90  * @param {Array} months - Lista de meses (1 a 12).
91  * @return {ee.ImageCollection} Colecao com bandas: precipitation, PET e wb.
92  */
93
94 var name\\_precip = "pr";
95 var name\\_pet = "pet";

```

```

96
97 function createWaterBalanceCollection(precipitation, pet, years, months) {
98   var waterBalance = ee.ImageCollection.fromImages(
99     years.map(function(y) {
100       return months.map(function(m) {
101         var P\\_1 = precipitation
102           .filter(ee.Filter.calendarRange(y, y, "year"))
103           .filter(ee.Filter.calendarRange(m, m, "month"))
104           .sum();
105
106         var PET\\_1 = pet
107           .filter(ee.Filter.calendarRange(y, y, "year"))
108           .filter(ee.Filter.calendarRange(m, m, "month"))
109           .sum()
110           // Ajuste de fator de escala da PET
111           .multiply(0.1);
112
113         var WB\\_1 = P\\_1.subtract(PET\\_1).rename("wb");
114
115         return ee.Image.cat([P\\_1, PET\\_1, WB\\_1])
116           .set("year", y)
117           .set("month", m)
118           .set("system:time\\_start", ee.Date.fromYMD(y, m, 15));
119       });
120     }).flatten()
121   );
122
123   return waterBalance;
124 }
125
126 /**
127  * 6) Calcula índice Z-Score (ex.: SPEI ou SPI) para um dado período (ex.: 3
128  *    meses, 2 meses, etc.).
129  *    - Aplica a fórmula:  $Z = (\text{valor\\_atual} - \text{media\\_hist}) / \text{desvio\\_padrao\\_hist}$ 
130  * @param {ee.Image} currentSum - Imagem com soma atual do período (wb\\_trans
131  *    ou precipitacao).
132  * @param {ee.Image} mean - Imagem de média histórica (mesmo período).
133  * @param {ee.Image} stdDev - Imagem de desvio-padrão histórico (mesmo período).
134  * @param {String} bandName - Nome da banda resultante.
135  * @return {ee.Image} Imagem com banda Z-score.
136  */
137 function computeZScore(currentSum, mean, stdDev, bandName) {
138   return currentSum
139     .subtract(mean)
140     .divide(stdDev)
141     .rename(bandName);
142 }
143
144 /**
145  * 7) Calcula índice pela distribuição Gama, considerando valor zero (adaptado
146  *    para SPI/SPEI).
147  *    - Utiliza aproximação de Abramowitz e Stegun para converter CDF em valor z
148  *    (gammainc).
149  * @param {ee.Image} currentSum - Soma atual (já com offset > 0 se necessário).

```

```

146 * @param {ee.ImageCollection} historicalCollection - Colecao historica (ja
      convertida em bandas ou passivel de toBands()).
147 * @param {ee.FeatureCollection|ee.Geometry} roi - Regiao de interesse.
148 * @param {String} bandName - Nome da banda de saida (ex.: 'SPEI-G' ou 'SPI-G').
149 * @return {ee.Image} Imagem com banda do indice na distribuicao Gama.
150 */
151 function computeGammaIndex(currentSum, historicalCollection, roi, bandName) {
152   var historicalBands = historicalCollection.toBands().clip(roi);
153
154   // Contagem de valores positivos
155   var countPositive = historicalBands.gt(0).reduce(ee.Reducer.sum());
156   var meanVal = historicalBands.reduce(ee.Reducer.sum()).divide(countPositive);
157
158   // Log das medias
159   var log\_meanVal = meanVal.log();
160   var log\_sumVal = historicalBands.log().reduce(ee.Reducer.sum());
161   var U = log\_meanVal.subtract(log\_sumVal.divide(countPositive));
162
163   // Parametros a e b
164   var a = U.multiply(4).divide(3).add(1).sqrt().add(1).divide(U.multiply(4)).
      rename('a');
165   var b = meanVal.divide(a).rename('b');
166
167   // Preparando CDF
168   var bx = currentSum.divide(b);
169   var gammaCDF\_result = bx.gammainc(a);
170
171   // Probabilidade de zeros
172   var countEqualZero = historicalBands.eq(0).reduce(ee.Reducer.sum());
173   var totalCount = countPositive.add(countEqualZero);
174   var probability\_zero = countEqualZero.divide(totalCount);
175
176   var hx = probability\_zero.add(
177     ee.Image.constant(1).subtract(probability\_zero).multiply(gammaCDF\_result
178   );
179
180   // Conversao da CDF para valor z
181   var t1 = ee.Image.constant(1).divide(hx.pow(2)).log().sqrt();
182   var t2 = ee.Image.constant(1)
183     .divide(ee.Image.constant(1).subtract(hx).pow(2))
184     .log()
185     .sqrt();
186
187   var condition = hx.lte(0.5);
188   var t = t2.where(condition, t1);
189
190   // Constantes (Abramowitz e Stegun)
191   var c0 = 2.515517;
192   var c1 = 0.802583;
193   var c2 = 0.010328;
194   var d1 = 1.432788;
195   var d2 = 0.189269;
196   var d3 = 0.001308;
197
198   var term\_1 = ee.Image.constant(c0)

```

```

199     .add ( ee. Image . constant( c1 ). multiply ( t ))
200     .add ( ee. Image . constant( c2 ). multiply ( t. pow ( 2 )));
201
202     var term\\_2 = ee. Image . constant( 1 ). add (
203         ee. Image . constant( d1 ). multiply ( t )
204         .add ( ee. Image . constant( d2 ). multiply ( t. pow ( 2 )))
205         .add ( ee. Image . constant( d3 ). multiply ( t. pow ( 3 )))
206     );
207
208     var index\\_gamma = t. subtract( term\\_1. divide ( term\\_2 ));
209     var finalIndex = index\\_gamma. where ( condition , index\\_gamma. multiply ( -1 )).
        rename ( bandName );
210
211     return finalIndex;
212 }
213
214 /**
215  * 8) Monta o contorno de uma ROI para exibicao no mapa.
216  * @param {ee.FeatureCollection|ee.Geometry} roi - Regiao de interesse.
217  * @param {String} color - Cor para pintar o contorno.
218  * @param {Number} width - Largura do contorno.
219  * @return {ee.Image} Imagem binaria com contorno.
220  */
221 function paintROIContour(roi, color, width) {
222     var empty = ee. Image (). byte ();
223     return empty. paint ({
224         featureCollection: roi,
225         color: 1,
226         width: width
227     });
228 }
229
230 /**
231  * 9) Calcula indices padronizados de vegetacao (NDVI-P, EVI-P, NDMI-P) usando Z
232  * -Score.
233  * @param {ee.ImageCollection} modCollection - Colecao (MOD13A3) com NDVI, EVI,
234  * NDMI.
235  * @param {ee.Image} currentImage - Imagem atual (NDVI, EVI, NDMI).
236  * @param {ee.Date} endDate - Data final para filtrar (mesmo mes).
237  * @param {ee.Date} startDate - Data de inicio (30 anos atras).
238  * @param {ee.FeatureCollection|ee.Geometry} roi - Area de interesse.
239  * @return {Object} Objeto com { NDVI\\_P, EVI\\_P, NDMI\\_P }.
240  */
241 function computeVegetationStandardizedIndices(modCollection, currentImage,
242     endDate, startDate, roi) {
243     // Filtra dados dos ultimos 30 anos no mesmo mes
244     var monthlyCollection = modCollection
245         .filter ( ee. Filter. gte ( 'system:time\\_start', startDate. millis ()))
246         .filter ( ee. Filter. lte ( 'system:time\\_start', endDate. millis ()))
247         .filter ( ee. Filter. calendarRange ( endDate. get ( 'month' ), endDate. get ( 'month' ),
248             'month' ))
249         .filterBounds ( roi )
250         // Exclui a imagem atual para nao contaminar a media
251         .filter ( ee. Filter. neq ( 'system:time\\_start', endDate. millis ()));
252
253     // Calcula medias e desvios-padrao

```

```

250 var meanNDVI = monthlyCollection.select(name\\_NDVI).reduce(ee.Reducer.mean());
251   ;
252   ;
253   ;
254   ;
255   ;
256   ;
257   ;
258   ;
259   ;
260   ;
261   ;
262   ;
263   ;
264   ;
265   ;
266   ;
267   ;
268   ;
269   ;
270   ;
271   ;
272   ;
273   ;
274   ;
275   ;
276   ;
277   ;
278   ;
279   ;
280   ;
281   ;
282   ;
283   ;
284   ;
285   ;
286   ;
287   ;
288   ;
289   ;
290   ;
291   ;
292   ;
293   ;
294   ;
295   ;
296   ;
297   ;
298   ;
299   ;
300   ;

```

```

// NDVI-P
var NDVI\\_P = currentImage.select(name\\_NDVI)
  .subtract(meanNDVI)
  .divide(sdNDVI)
  .rename('NDVI-P');

// EVI-P
var EVI\\_P = currentImage.select(name\\_EVI)
  .subtract(meanEVI)
  .divide(sdEVI)
  .rename('EVI-P');

// NDMI-P
var NDMI\\_P = currentImage.select(name\\_NDMI)
  .subtract(meanNDMI)
  .divide(sdNDMI)
  .rename('NDMI-P');

return {
  NDVI\\_P: NDVI\\_P,
  EVI\\_P: EVI\\_P,
  NDMI\\_P: NDMI\\_P
};
}

```

```

/**
 * 10) Constroi o indice EIRS (Escala Integrada de Resposta a Seca) a partir de
 *    combinacoes de indices (exemplo).
 * @param {ee.Image} eviP - Imagem com banda EVI-P.
 * @param {ee.Image} ndmiP - Imagem com banda NDMI-P.
 * @param {ee.Image} spiG - Imagem com banda SPI-G.
 * @param {ee.Image} speiG - Imagem com banda SPEI-G.
 * @return {ee.Image} Imagem com banda 'EIRS'.
 */

// Indice Integrado de Hidrometeorologia e Vegetacao (IIHV)
function computeIIHV(eviP, ndmiP, spiG, speiG, G, U, T) {
  var denominator = (2 * G) + U + T; // (G + G) + U + T

  // Numerador = (EVI\\_P + NDMI\\_P)*G + SPI\\_G*U + SPEI\\_G*T
  var numerator = eviP.add(ndmiP).multiply(G)
    .add(spiG.multiply(U))
    .add(speiG.multiply(T));

```

```

301
302     return numerator.divide(denominator).rename('IIHV');
303 }
304
305 /* *****
306  * CODIGO PRINCIPAL (APLICACAO UI)
307  * ***** */
308
309 // Criando o painel lateral esquerdo
310 var painel = ui.Panel({
311     layout: ui.Panel.Layout.flow('vertical'),
312     style: { width: '300px', padding: '10px', backgroundColor: 'white' }
313 });
314
315
316 var logo = ee.Image('projects/ee-carvalhovaldo89/assets/IIHV\\_logo');
317
318 // Separar as bandas de cor (R, G, B)
319 var rgb = logo.select(['b1', 'b2', 'b3']);
320
321 // Aplicar a transparencia (b4 como mascara)
322 var alpha = logo.select('b4').divide(255);
323 var logoMasked = rgb.updateMask(alpha);
324
325 // Criar o thumbnail
326 var branding = ui.Thumbnail({
327     image: logoMasked,
328     params: {bands: ['b1', 'b2', 'b3'], min: 0, max: 255},
329     style: {width: '150px', height: '150px'}
330 });
331
332 // Criar um painel para conter a logo e centraliza-la
333 var logoPanel = ui.Panel({
334     widgets: [branding], // Adiciona a logo
335     style: {
336         width: '100\\%',           // Ocupa toda a largura do painel
337         textAlign: 'center',       // Centraliza o conteudo
338         padding: '10px'           // Adiciona espacamento
339     }
340 });
341
342 // Adicionar ao painel principal
343 //painel.add(branding);
344 painel.add(logoPanel);
345
346 // Titulo do painel
347 var titulo = ui.Label({
348     value: 'Indice Integrado de Hidrometeorologia e Vegetacao (IIHV)',
349     style: { fontWeight: 'bold', fontSize: '16px', margin: '0 0 10px 0' }
350 });
351 painel.add(titulo);
352
353 // Texto explicativo sobre o IIHV
354 var descricaoIIHV = ui.Label({
355     value: 'permite a analise integrada das condicoes hidrometeorologicas e
           vegetacionais, fornecendo uma avaliacao detalhada sobre a disponibilidade

```

```

        hidrica e os impactos das secas na vegetacao. Combinando multiplos indices
        ambientais, permitindo identificar padroes de seca e umidade, auxiliando na
        gestao de recursos hidricos, planejamento agricola, monitoramento ambiental
        e mitigacao de desastres naturais.',
356     style: {
357         fontSize: '12px',
358         margin: '10px 0',
359         textAlign: 'justify'
360     }
361 });
362
363 // Adicionar ao painel principal
364 painel.add( descricao IIHV );
365
366
367 // Lista de Bacias Hidrograficas
368 var listaBacias = [
369     'Alto Tocantins', 'Araguaia', 'Baixo Tocantins', 'Foz do Amazonas',
370     'Gurupi', 'Japura', 'Javari/Jurua', 'Madeira', 'Negro', 'Oiapoque/Araguari',
371     'Paru/Jari', 'Purus', 'Tapajos', 'Trombetas/Uatuma', 'Xingu'
372 ];
373 var selectBacia = ui.Select({ items: listaBacias, placeholder: 'Selecione a
        Bacia ' });
374 painel.add(ui.Label('Bacia Hidrografica:'));
375 painel.add( selectBacia );
376
377 // Selecao do ano
378 var inputAno = ui.Slider({ min: 2003, max: 2023, value: 2023, step: 1 });
379 painel.add(ui.Label('Ano (2003-2023):'));
380 painel.add( inputAno );
381
382 // Selecao do mes
383 var inputMes = ui.Slider({ min: 1, max: 12, value: 12, step: 1 });
384 painel.add(ui.Label('Mes:'));
385 painel.add( inputMes );
386
387 // Sliders para G, U e T
388 var sliderG = ui.Slider({ min: 0, max: 3, value: 1, step: 0.1 });
389 painel.add(ui.Label('Gravidade (G):'));
390 painel.add( sliderG );
391
392 var sliderU = ui.Slider({ min: 0, max: 3, value: 2, step: 0.1 });
393 painel.add(ui.Label('Urgencia (U):'));
394 painel.add( sliderU );
395
396 var sliderT = ui.Slider({ min: 0, max: 3, value: 3, step: 0.1 });
397 painel.add(ui.Label('Tendencia (T):'));
398 painel.add( sliderT );
399
400 // Criando um painel para os autores
401 var painelAutores = ui.Panel({
402     layout: ui.Panel.Layout.flow('vertical'), // Empilhar os textos verticalmente
403     style: { margin: '10px 0' }
404 });
405
406 // Criando o painel centralizado para os resumos estatisticos

```

```

407 var painelEstatisticas = ui.Panel({
408   layout: ui.Panel.Layout.flow('vertical'),
409   style: {
410     position: 'top-left', // top-left, 'top-center', 'top-right', 'middle-left',
411     'middle-right', 'bottom-left', 'bottom-center', 'bottom-right'.
412     width: 'auto',          // Define um tamanho fixo para nao ocupar toda a
413     tela
414     height: '140px',        // Ajuste dinamico de altura
415     padding: '5px',
416     backgroundColor: 'rgba(255, 255, 255, 1)', // Fundo
417     border: '1px solid black'
418   }
419 });
420 // Adicionando titulo ao painel
421 var tituloEstatisticas = ui.Label({
422   value: 'Resumo Estatistico',
423   style: {
424     fontWeight: 'bold',
425     fontSize: '14px',
426     margin: '0px 0px 5px 0px'
427   }
428 });
429 painelEstatisticas.add(tituloEstatisticas);
430 // Criando labels para os valores medios
431 var labelPrecipitacao = ui.Label('Precipitacao : -- mm');
432 var labelEvapotranspiracao = ui.Label('Evapotranspiracao : -- mm');
433 var labelBalancoHidrico = ui.Label('Balanco Hidrico : -- mm');
434
435 // Adicionando labels ao painel
436 painelEstatisticas.add(labelPrecipitacao);
437 painelEstatisticas.add(labelEvapotranspiracao);
438 painelEstatisticas.add(labelBalancoHidrico);
439
440 // Adicionando o painel ao mapa
441 //ui.root.insert(1, painelEstatisticas);
442
443 Map.add(painelEstatisticas);
444
445 // Funcao para atualizar os valores no painel de estatisticas
446 function atualizarPainelEstatisticas(meanPRP, meanPET, meanBW, meanSPEI3M) {
447   labelPrecipitacao.setValue('Precipitacao Media: ' + meanPRP.toFixed(2) + ' mm'
448   );
449   labelEvapotranspiracao.setValue('Evapotranspiracao Media: ' + meanPET.toFixed
450   (2) + ' mm');
451   labelBalancoHidrico.setValue('Balanco Hidrico Medio: ' + meanBW.toFixed(2) + '
452   mm');
453 }
454
455 // Definir as classes do IIHV com cores
456 var iihvClasses = [
457   { name: "Seca Extrema", min: null, max: -2.0, inclusiveMax: false, color:
458     "\\#824 B09" }, // IIHV < -2,0

```

```

457 { name: "Seca Severa ", min: -2.0, max: -1.5, inclusiveMax: false, color:
    "\\#C28633" }, // -2,0 <= IIHV < -1,5
458 { name: "Seca Moderada ", min: -1.5, max: -1.0, inclusiveMax: false, color:
    "\\#DCBC75" }, // -1,5 <= IIHV < -1,0
459 { name: "Seca Leve ", min: -1.0, max: -0.5, inclusiveMax: false, color:
    "\\#BFA475" }, // -1,0 <= IIHV < -0,5
460 { name: "Neutro ", min: -0.5, max: 0.5, inclusiveMax: true, color:
    "\\#FFFFFF" }, // -0,5 <= IIHV <= 0,5
461 // { name: "Neutro ", min: -0.4, max: 0.4, inclusiveMax: true, color:
    "\\#FFFFFF" },
462 { name: "Umidade Leve ", min: 0.5, max: 1.0, inclusiveMax: false, color:
    "\\#79FFBC" }, // 0,5 < IIHV <= 1,0
463 { name: "Umidade Moderada ", min: 1.0, max: 1.5, inclusiveMax: false, color:
    "\\#79C8BC" }, // 1,0 < IIHV <= 1,5
464 { name: "Umidade Alta ", min: 1.5, max: 2.0, inclusiveMax: false, color:
    "\\#3B9B93" }, // 1,5 < IIHV <= 2,0
465 { name: "Umidade Extrema ", min: 2.0, max: null, inclusiveMax: false, color:
    "\\#015F56" } // IIHV > 2,0
466 ];
467
468 function calcularAreaClasseIIHV(classe, IIHV, roi) {
469     var mask;
470
471     if (classe.min === null) {
472         // Para "Seca Extrema" (IIHV < -2.0)
473         mask = IIHV.lt(classe.max);
474     } else if (classe.max === null) {
475         // Para "Umidade Extrema" (IIHV > 2.0)
476         mask = IIHV.gt(classe.min);
477     } else if (classe.inclusiveMax) {
478         // Para "Neutro" (-0.5 <= IIHV <= 0.5) - inclui o limite superior
479         mask = IIHV.gte(classe.min).and(IIHV.lte(classe.max));
480     } else {
481         // Para todas as outras classes - limite superior exclusivo
482         mask = IIHV.gte(classe.min).and(IIHV.lt(classe.max));
483     }
484
485     // Obtem a escala do mapa dinamicamente para evitar erro de memoria
486     var mapScale = Map.getScale();
487     var scale = mapScale > 5000 ? mapScale * 1.5 : 5000;
488
489     var areaImage = mask.multiply(ee.Image.pixelArea());
490     var areaTotal = areaImage.reduceRegion({
491         reducer: ee.Reducer.sum(),
492         geometry: roi,
493         scale: scale,
494         maxPixels: 1e13
495     }).getNumber('IIHV').divide(1e6);
496
497     return {
498         name: classe.name,
499         color: classe.color,
500         area\\_km2: areaTotal
501     };
502 }
503

```

```

504 // Criando o painel da legenda no canto inferior esquerdo para o grafico de
      pizza
505 var painelGraficoIIHV = ui.Panel({
506   layout: ui.Panel.Layout.flow('vertical'),
507   style: {
508     position: 'bottom-left', // Define a posicao no canto inferior esquerdo
509     width: '250px',          // Define um tamanho fixo para nao ocupar toda a
      tela
510     height: 'auto',          // Ajuste dinamico de altura
511     padding: '0px', // Remove espaco extra ao redor do grafico
512     backgroundColor: 'rgba(255, 255, 0.9)', // Fundo semi-transparente
513     border: '1px solid black'
514   }
515 });
516
517 // Adicionando titulo ao painel
518 var tituloGraficoIIHV = ui.Label({
519   value: 'IIHV em \\%',
520   style: {
521     fontWeight: 'bold',
522     fontSize: '14px',
523     textAlign: 'center',
524     margin: '2px 0px 5px 90px' // Pequeno espacamento para melhor visualizacao
525   }
526 });
527
528 painelGraficoIIHV.add(tituloGraficoIIHV);
529
530 // Adiciona o painel ao mapa (garantia de que ele aparece)
531 Map.add(painelGraficoIIHV);
532
533 // Criar o grafico de pizza para distribuicao do IIHV
534 function plotarGraficoPizzaIIHV(IIHV, roi) {
535   var areasClassesIIHV = iihvClasses.map(function(c) {
536     return calcularAreaClasseIIHV(c, IIHV, roi);
537   });
538
539   // Criar uma tabela formatada
540   var tabelaPizzaIIHV = ["Classe", "Area (km^2)"].concat(
541     areasClassesIIHV.map(function(c) {
542       var areaKm2 = c.area\\_km2.getInfo();
543       areaKm2 = areaKm2 !== null ? Math.round(areaKm2 * 100) / 100 : 0; //
      Arredondar para 2 casas decimais
544       return [c.name, areaKm2];
545     })
546   );
547
548   var coresPizzaIIHV = areasClassesIIHV.map(function(c) { return c.color; });
549
550   // Criar o grafico de pizza com tamanho ajustado
551   var graficoPizzaIIHV = ui.Chart(tabelaPizzaIIHV)
552     .setChartType("Pie Chart")
553     .setOptions({
554       //title: null, // Removendo o titulo dentro do grafico
555       title: null,
556       //width: 300, // Ajuste do tamanho do grafico

```

```

557     width: '100\\%', // Permitir que o grafico ocupe toda a largura do painel
558     height: 250, // Ajustar altura dinamicamente
559     //height: 300,
560     is3D: true,
561     sliceVisibilityThreshold: 0, // Mostrar todas as classes, mesmo que
    pequenas
562     colors: coresPizzaiIHV,
563     fontSize: 12,
564     //legend: { position: "right", textStyle: { fontSize: 10 } },
565     legend: { position: 'none' },
566     // Exibir rotulos dentro das fatias com valores reais incluidos
567     pieSliceText: 'label',
568     pieSliceTextStyle: {
569         color: 'black',
570         fontSize: 14
571     },
572     });
573
574 // Removendo elementos antigos do painel
575 painelGraficoIIHV.clear();
576 painelGraficoIIHV.add(tituloGraficoIIHV);
577 painelGraficoIIHV.add(graficoPizzaIIHV);
578
579 }
580
581 // //////////////////////////////////////
582
583 function atualizarIIHV() {
584     // 1) Resetando o mapa no inicio da funcao
585     Map.layers().reset();
586
587     var ano = inputAno.getValue();
588     var mes = inputMes.getValue();
589     var bacia = selectBacia.getValue();
590     var G = sliderG.getValue();
591     var U = sliderU.getValue();
592     var T = sliderT.getValue();
593
594     if (!ano || !mes || !bacia) {
595         print('Erro: Preencha todos os campos!');
596         return;
597     }
598
599     ano = parseInt(ano, 10);
600     mes = parseInt(mes, 10);
601
602     // 2) Atualizar ROI com a bacia selecionada
603     // Carregar FeatureCollection de MesoRH e definir ROI
604     var mesoRH = ee.FeatureCollection("projects/ee-carvalhoaldo89/assets/SNIRH\\
        _BHN250 \\ _mesoRH \\ _Norte \\ _organizado ");
605
606     var roi = getROI(mesoRH, bacia);
607     Map.centerObject(roi, 6);
608
609     /* *****
610     * Criar as Colecoes

```

```

611 ***** */
612 //3 Criar colecao de Balanco Hidrico
613 var years = ee.List.sequence(1993, 2023);
614 var months = ee.List.sequence(1, 12);
615
616 // Definir datas conforme o ano e mes selecionados
617 var end\\_ee\\_date = ee.Date.fromYMD(ano, mes, 15);
618 var start\\_ee\\_date\\_2M = end\\_ee\\_date.advance(-1, 'month');
619 var start\\_ee\\_date\\_3M = end\\_ee\\_date.advance(-2, 'month');
620
621 var day\\_difference\\_2M = end\\_ee\\_date.difference(start\\_ee\\_date\\_2M,
622   'day');
623 var day\\_difference\\_3M = end\\_ee\\_date.difference(start\\_ee\\_date\\_3M,
624   'day');
625
626 var PET = ee.ImageCollection("IDAHO\\_EPSCOR/TERRACLIMATE")
627   .select(name\\_pet)
628   .filterDate("1993-01-01", "2023-12-31")
629   .map(function(img) {
630     return img.clip(roi).copyProperties(img);
631   });
632
633 var PRECIP = ee.ImageCollection("IDAHO\\_EPSCOR/TERRACLIMATE")
634   .select(name\\_precip)
635   .filterDate("1993-01-01", "2023-12-31")
636   .map(function(img) {
637     return img.clip(roi).copyProperties(img);
638   });
639
640 var waterBalance = createWaterBalanceCollection(PRECIP, PET, years, months);
641
642 // precipitacao, evapotranspiracao e balanço hídrico para data final
643 var BW = waterBalance.filter(ee.Filter.eq('system:time\\_start', end\\_ee\\_
644   _date));
645 //print('Balanço Hídrico em ' + end\\_ee\\_date.format('MM-YYYY').getInfo(),
646   BW);
647
648 var PRP\\_1 = BW.select(name\\_precip);
649
650 // Obtem a escala do mapa dinamicamente para evitar erro de memoria
651 var mapScale = Map.getScale();
652 var scale = mapScale > 5000 ? mapScale * 1.5 : 5000;
653
654 var MeanPRP = PRP\\_1.first().reduceRegion({
655   reducer: ee.Reducer.mean(),
656   geometry: roi.geometry(),
657   scale: scale,
658   maxPixels: 1e13,
659   }).get('pr');
660
661 print('Media do Precipitacao na Bacia (mm):', MeanPRP);
662
663 //4) Precipitacao
664 var estatisticas\\_PRP = PRP\\_1.first().reduceRegion({
665   reducer: ee.Reducer.minMax(),

```

```

663     geometry: roi.geometry(),
664     scale: scale,
665     maxPixels: 1e13
666   });
667
668   //Decomete para verificar o nome das propriedades. Que ira ser no fomato o
669   //nome da variavel seguido de \\_max e \\_min.
670   //print("Estatisticas de Precipitacao:", estatisticas\\_PRP);
671
672   var PrecipitationVis = {
673     min: estatisticas\\_PRP.get('pr\\_min').getInfo(),
674     max: estatisticas\\_PRP.get('pr\\_max').getInfo(),
675     palette: ['FFFFFF', 'd0fbff', '1AE4FF', '339CFF', '4D55FF', '664DFF', '7
676     F46FF', '993EFF', 'B236FF', 'CC2FFF', 'E628FF', 'FF21FF', 'FF28E6', 'FF2FCC'
677     , 'FF37B2', 'FF3E99', '800080'],
678   };
679
680   //5) Evapotranspiracao
681   var PET\\_1 = BW.select(name\\_pet);
682
683   var MeanPET = PET\\_1.first().reduceRegion({
684     reducer: ee.Reducer.mean(),
685     geometry: roi.geometry(),
686     scale: scale,
687     maxPixels: 1e13,
688   }).get('pet');
689
690   print('Media da Evapotranspiracao Potencial (mm):', MeanPET);
691
692   var palettes\\_PET = require('users/samapriya/utils:palettes');
693
694   var estatisticas\\_PET = PET\\_1.first().reduceRegion({
695     reducer: ee.Reducer.minMax(),
696     geometry: roi.geometry(),
697     scale: scale,
698     maxPixels: 1e13
699   });
700
701   var petVis = {
702     min: estatisticas\\_PET.get('pet\\_min').getInfo(),
703     max: estatisticas\\_PET.get('pet\\_max').getInfo(),
704     palette: palettes\\_PET.MET.Monet,
705   };
706
707   //6) Balanco Hidrico
708   var BW\\_1 = BW.select('wb');
709
710   var MeanBW = BW\\_1.first().reduceRegion({
711     reducer: ee.Reducer.mean(),
712     geometry: roi.geometry(),
713     scale: scale,
714     maxPixels: 1e13,
715   }).get('wb');
716
717   print('Media do Balanco Hidrico (mm):', MeanBW);

```

```

716
717 var estatisticas\\_BW = BW\\_1.first().reduceRegion({
718   reducer: ee.Reducer.minMax(),
719   geometry: roi.geometry(),
720   scale: scale,
721   maxPixels: 1e13
722 });
723
724 //print("Estatísticas do Balanço Hídrico:", estatisticas\\_BW);
725
726 var balanceVis = {
727   min: estatisticas\\_BW.get('wb\\_min').getInfo(),
728   max: estatisticas\\_BW.get('wb\\_max').getInfo(),
729   palette: ['#650000', '#b02323', '#d35454', '#cc9e99', '#e6e2ac', '#99
730   accc', '#5676d6', '#2222ab', '#380061'],
731 };
732
733 // 7) Calcular SPEI-3 Z-Score
734 // Somar WB de 3 meses
735 var waterBalance\\_cte = waterBalance.map(function(image) {
736   return image
737     .select('wb')
738     // Caso necessario, adicionar um offset > 0 para evitar log(0). Aqui esta
739     // O.
740     .add(0)
741     .rename('wb\\_trans')
742     .copyProperties(image, ["system:time\\_start", "year", "month"]);
743 });
744
745 var BW\\_Current\\_3M = waterBalance\\_cte
746   .filter(ee.Filter.gte('system:time\\_start', start\\_ee\\_date\\_3M))
747   .filter(ee.Filter.lte('system:time\\_start', end\\_ee\\_date))
748   .select('wb\\_trans')
749   .sum()
750   .clip(roi);
751
752 // Climatologia (3 meses) - Coleção transformada em bandas
753 var climatologyWB\\_3M = ee.ImageCollection.fromImages(
754   years.map(function(year) {
755     var start = ee.Date.fromYMD(
756       year,
757       start\\_ee\\_date\\_3M.get('month').int(),
758       start\\_ee\\_date\\_3M.get('day').int()
759     );
760     var end = start.advance(day\\_difference\\_3M.subtract(1), 'day');
761     var image = waterBalance\\_cte
762       .filterDate(start, end)
763       .select('wb\\_trans')
764       .sum();
765     return image.set({
766       'year': year,
767       'start\\_date': start.format('YYYY-MM-dd'),
768       'end\\_date': end.format('YYYY-MM-dd')
769     });
770   })
771 ).toBands().clip(roi);

```

```

770
771 // Media e desvio padrao
772 var mean\\_WB\\_3M = climatologyWB\\_3M.reduce(ee.Reducer.mean());
773 var sd\\_WB\\_3M = climatologyWB\\_3M.reduce(ee.Reducer.stdDev());
774
775 // SPEI-3 (Z-Score)
776 var SPEI\\_3M = computeZScore(BW\\_Current\\_3M, mean\\_WB\\_3M, sd\\_WB\\_3M,
    'SPEI-3');
777
778 var MeanSPEI\\_3M = SPEI\\_3M.reduceRegion({
779   reducer: ee.Reducer.mean(),
780   geometry: roi.geometry(),
781   scale: scale,
782   maxPixels: 1e13,
783 }).get('SPEI-3');
784
785 print('Media do SPEI-3 (Z-SCORE) :', MeanSPEI\\_3M);
786
787 var speiVis = { min: -2.5, max: 2.5, palette: ['824B09','C28633','DCBC75','
    BFA475','FFFFFF','79FFBC','79C8BC','3B9B93','015F56']};
788
789
790 // 6.2) SPEI-3 Gamma
791 // Precisamos que seja uma colecao; entao empacotamos a imagem em um array
792 var waterBalanceCurrentPositive = ee.ImageCollection([
793   BW\\_Current\\_3M // apenas 1 imagem
794 ]).map(function(img) {
795   return img.add(1000).rename('WB\\_adjusted'); // offset para evitar log(0)
796 });
797
798 var climatologyWB\\_3M\\_Collection = ee.ImageCollection.fromImages(
799   years.map(function(year) {
800     var start = ee.Date.fromYMD(
801       year,
802       start\\_ee\\_date\\_3M.get('month').int(),
803       start\\_ee\\_date\\_3M.get('day').int()
804     );
805     var end = start.advance(day\\_difference\\_3M, 'day');
806     var image = waterBalance\\_cte
807       .filterDate(start, end)
808       .select('wb\\_trans')
809       .sum();
810     return image.clip(roi).set({
811       'year': year,
812       'start\\_date': start.format('YYYY-MM-dd'),
813       'end\\_date': end.format('YYYY-MM-dd')
814     });
815   })
816 );
817
818 // Removendo a ultima imagem (imagem corrente esta dentro da colecao para
    climatologia)
819 var wbList = climatologyWB\\_3M\\_Collection.toList(climatologyWB\\_3M\\_
    _Collection.size());
820 var waterBalanceHistoricalPositive = ee.ImageCollection(
821   wbList.slice(0, wbList.length().subtract(1))

```

```

822   ).map(function(img) {
823     return img.add(1000).rename('WB\\_adjusted');
824   });
825
826   // Soma atual das imagens na colecao (nesse caso e apenas 1)
827   var waterBalanceCurrentSum = waterBalanceCurrentPositive.sum().clip(roi);
828
829   // Indice Gamma
830   var SPEI\\_G = computeGammaIndex(
831     waterBalanceCurrentSum,
832     waterBalanceHistoricalPositive,
833     roi,
834     'SPEI-3-Gamma'
835   );
836
837   var MeanSPEI\\_G = SPEI\\_G.reduceRegion({
838     reducer: ee.Reducer.mean(),
839     geometry: roi.geometry(),
840     scale: scale,
841     maxPixels: 1e13,
842   }).get('SPEI-3-Gamma');
843
844   print('Media do SPEI-3 (Gamma) :', MeanSPEI\\_G);
845
846   // 7) SPI-2 Z-Score
847   var waterBalance\\_prp = waterBalance.map(function(image) {
848     return image.select(name\\_precip)
849       .copyProperties(image, ["system:time\\_start", "year", "month"]);
850   });
851
852   // Soma de 2 meses
853   var PRP\\_Current\\_2M = waterBalance\\_prp
854     .filter(ee.Filter.gte('system:time\\_start', start\\_ee\\_date\\_2M))
855     .filter(ee.Filter.lte('system:time\\_start', end\\_ee\\_date))
856     .select(name\\_precip)
857     .sum()
858     .clip(roi);
859
860   // Climatologia 2 meses
861   var climatologyPRP\\_2M = ee.ImageCollection.fromImages(
862     years.map(function(year) {
863       var start = ee.Date.fromYMD(
864         year,
865         start\\_ee\\_date\\_2M.get('month').int(),
866         start\\_ee\\_date\\_2M.get('day').int()
867       );
868       var end = start.advance(day\\_difference\\_2M.subtract(1), 'day');
869       var image = waterBalance\\_prp
870         .filterDate(start, end)
871         .select(name\\_precip)
872         .sum();
873       return image.set({
874         'year': year,
875         'start\\_date': start.format('YYYY-MM-dd'),
876         'end\\_date': end.format('YYYY-MM-dd')

```

```

877     });
878   })
879   ).toBands().clip(roi);
880
881   var mean\\_PRP\\_2M = climatologyPRP\\_2M.reduce(ee.Reducer.mean());
882   var sd\\_PRP\\_2M = climatologyPRP\\_2M.reduce(ee.Reducer.stdDev());
883
884   // SPI-2 Z-Score
885   var SPI\\_2M = computeZScore(PRP\\_Current\\_2M, mean\\_PRP\\_2M, sd\\_PRP\\_
     _2M, 'SPI-2');
886
887   var MeanSPI\\_2M = SPI\\_2M.reduceRegion({
888     reducer: ee.Reducer.mean(),
889     geometry: roi.geometry(),
890     scale: scale,
891     maxPixels: 1e13,
892   }).get('SPI-2');
893
894   print('Media do SPI-2 (Z-SCORE) :', MeanSPI\\_2M);
895
896   // SPI-2 Gamma
897   // Empacotando em colecao, pois PRP\\_Current\\_2M tambem e imagem unica
898   var precipitationCurrentPositive = ee.ImageCollection([PRP\\_Current\\_2M])
899     .map(function(image) {
900       // Se precisar somar offset, faca aqui: .add(1000).rename('xyz')
901       return image
902         .set('system:time\\_start', image.get('system:time\\_start'))
903         .set('system:index', image.get('system:index'));
904     });
905
906   var climatologyPRP\\_2M\\_Collection = ee.ImageCollection.fromImages(
907     years.map(function(year) {
908       var start = ee.Date.fromYMD(
909         year,
910         start\\_ee\\_date\\_2M.get('month').int(),
911         start\\_ee\\_date\\_2M.get('day').int()
912       );
913       var end = start.advance(day\\_difference\\_2M, 'day');
914       var image = waterBalance\\_prp
915         .filterDate(start, end)
916         .select(name\\_precip)
917         .sum();
918       return image.clip(roi).set({
919         'year': year,
920         'start\\_date': start.format('YYYY-MM-dd'),
921         'end\\_date': end.format('YYYY-MM-dd')
922       });
923     })
924   );
925
926   // Remover ultima imagem, se necessario
927   var prpList = climatologyPRP\\_2M\\_Collection.toList(climatologyPRP\\_2M\\_
     _Collection.size());
928   var precipitationHistoricalPositive = ee.ImageCollection(
929     prpList.slice(0, prpList.length().subtract(1))
930   );

```

```

931
932 // Soma atual
933 var precipitationCurrentSum = precipitationCurrentPositive.sum().clip(roi);
934 var SPI\\_G = computeGammaIndex(precipitationCurrentSum,
935     precipitationHistoricalPositive, roi, 'SPI-2-Gamma');
936
937 var MeanSPI\\_G = SPI\\_G.reduceRegion({
938     reducer: ee.Reducer.mean(),
939     geometry: roi.geometry(),
940     scale: scale,
941     maxPixels: 1e13,
942 });
943 print('Media do SPI-2 (Gamma) :', MeanSPI\\_G);
944
945 // 3) Filtrar colecoes
946 var mod13a3\\_raw = ee.ImageCollection("MODIS/061/MOD13A3")
947     .filterDate("2000-01-01", "2023-12-31")
948     .filterBounds(roi);
949
950 // Processar a colecao mod13a3 (recorte, escala, NDMI)
951 var mod13a3 = mod13a3\\_raw
952     .map(function(img) { return clipAndScale(img, roi); })
953     .map(calculateNDMI)
954     .map(adjustTime)
955     .select([name\\_NDVI, name\\_EVI, name\\_NDMI]);
956
957 var end\\_date\\_millis = end\\_ee\\_date.millis();
958 var REFL\\_Current = mod13a3.filter(ee.Filter.eq('system:time\\_start', end\\_
959     _date\\_millis));
960
961 var REFL\\_Current\\_Image = REFL\\_Current.first();
962
963 // 8.1 Indices Padronizados de Vegetacao (30 anos)
964 var start\\_30Years = end\\_ee\\_date.advance(-30, 'year');
965
966 var vegetationIndices = computeVegetationStandardizedIndices(
967     mod13a3,
968     REFL\\_Current\\_Image,
969     end\\_ee\\_date,
970     start\\_30Years,
971     roi
972 );
973
974 // Capturar a media em area para NDMI\\_P e EVI\\_P separadamente
975 var MeanNDMI\\_P = vegetationIndices.NDMI\\_P.reduceRegion({
976     reducer: ee.Reducer.mean(),
977     geometry: roi.geometry(),
978     scale: scale,
979     maxPixels: 1e13
980 });
981 print('Media do NDMI-P :', MeanNDMI\\_P);
982
983 var MeanEVI\\_P = vegetationIndices.EVI\\_P.reduceRegion({
984     reducer: ee.Reducer.mean(),

```

```

985     geometry: roi.geometry(),
986     scale: scale,
987     maxPixels: 1e13
988   }).get('EVI-P');
989
990   print('Media do EVI-P :', MeanEVI\\_P);
991
992   var estatisticas\\_NDVI = REFL\\_Current.select(name\\_NDVI).first().
993     reduceRegion({
994       reducer: ee.Reducer.minMax(),
995       geometry: roi.geometry(),
996       scale: scale,
997       maxPixels: 1e13
998     });
999
1000   var estatisticas\\_EVI = REFL\\_Current.select(name\\_EVI).first().
1001     reduceRegion({
1002       reducer: ee.Reducer.minMax(),
1003       geometry: roi.geometry(),
1004       scale: scale,
1005       maxPixels: 1e13
1006     });
1007
1008   var estatisticas\\_NDMI = REFL\\_Current.select(name\\_NDMI).first().
1009     reduceRegion({
1010       reducer: ee.Reducer.minMax(),
1011       geometry: roi.geometry(),
1012       scale: scale,
1013       maxPixels: 1e13
1014     });
1015
1016   // Calcular IIHV com novos valores de G, U e T
1017   var IIHV = computeIIHV(
1018     vegetationIndices.EVI\\_P,
1019     vegetationIndices.NDMI\\_P,
1020     SPI\\_G,
1021     SPEI\\_G,
1022     G,
1023     U,
1024     T
1025   );
1026
1027   var IIHVClassificada = IIHV
1028     .where(IIHV.lte(-2.0), 1) // Seca Extrema
1029     .where(IIHV.gt(-2.0).and(IIHV.lte(-1.5)), 2) // Seca Severa
1030     .where(IIHV.gt(-1.5).and(IIHV.lte(-1.0)), 3) // Seca Moderada
1031     .where(IIHV.gt(-1.0).and(IIHV.lte(-0.5)), 4) // Seca Leve
1032     .where(IIHV.gt(-0.5).and(IIHV.lte(0.5)), 5) // Neutro
1033     .where(IIHV.gt(0.5).and(IIHV.lte(1.0)), 6) // Umidade Leve
1034     .where(IIHV.gt(1.0).and(IIHV.lte(1.5)), 7) // Umidade Moderada
1035     .where(IIHV.gt(1.5).and(IIHV.lte(2.0)), 8) // Umidade Alta
1036     .where(IIHV.gt(2.0), 9); // Umidade Extrema
1037
1038   var MeanIIHV = IIHV.reduceRegion({
1039     reducer: ee.Reducer.mean(),
1040     geometry: roi.geometry(),

```

```

1038     scale : scale ,
1039     maxPixels: 1e13
1040   }).get('IIHV');
1041
1042   print('Media do IIHV :',    MeanIIHV);
1043
1044   // Chamar a funcao para exibir o grafico de pizza das classes do IIHV
1045   plotarGraficoPizzaIIHV(IIHV, roi);
1046
1047   // Carregar FeatureCollection do S2ID
1048   var S2ID = ee.FeatureCollection("projects/ee-carvalhoaldo89/assets/S2ID\\_sf
    \\_shapefile");
1049
1050   // Criar corretamente `system:time\\_start` e `DataFormatada`
1051   var S2ID\\_com\\_tempo = S2ID.map(function(feature) {
1052     var dataEpoch = ee.Number(feature.get("DataEvent")); // Converte para
    numero
1053     var dataFormatada = ee.Date(feature.get("DataEvent")).format("YYYY-MM-dd");
    // Formata para string de data
1054     return feature.set({
1055       "system:time\\_start": dataEpoch,
1056       "DataFormatada": dataFormatada // Adiciona o novo atributo
1057     });
1058   });
1059
1060   var start\\_date\\_S2ID = end\\_ee\\_date.update({day: 1});
1061   var end\\_date\\_S2ID = start\\_date\\_S2ID.advance(1,"month").advance(-1,"day
    ");
1062
1063   var S2ID\\_filtrado = S2ID\\_com\\_tempo
1064     .filterBounds(roi) // Filtro espacial primeiro!
1065     .filter(ee.Filter.date(start\\_date\\_S2ID, end\\_date\\_S2ID)); // Filtro
    temporal correto
1066
1067   // Extrai os nomes dos municipios e garante que sejam unicos
1068   var municipiosUnicos = S2ID\\_filtrado.aggregate\\_array('NomeMunic').distinct
    ().sort();
1069
1070   // Imprime a lista de municipios unicos
1071   print("Registros de Municipios afetados no S2ID :", municipiosUnicos);
1072
1073   if ( municipiosUnicos.size() === 0) {
1074     print('Nao houve registros de ventos de desastres em ' + end\\_ee\\_date .
    format('MM-YYYY').getInfo());
1075   } else {
1076     print("Total de registros de eventos de desastres em " + end\\_ee\\_date .
    format('MM-YYYY').getInfo() + ":", S2ID\\_filtrado.size());
1077     //print("S2ID\\_filtrado", S2ID\\_filtrado);
1078   }
1079
1080   // Definir as cores para cada GrupoDesa corretamente usando ee.Dictionary
1081   var coresDesastres = ee.Dictionary({
1082     "Climatologico": "orange",
1083     "Hidrologico": "blue",
1084     "Meteorologico": "green",
1085     "Outros": "red"

```

```

1086 });
1087
1088 // Definir as formas para cada tipo de desastre usando ee.Dictionary
1089 var formasDesastres = ee.Dictionary({
1090   "Alagamentos": "circle",
1091   "Chuvas Intensas": "square",
1092   "Doencas infecciosas": "diamond",
1093   "Enxurradas": "square",
1094   "Erosao ": "triangle ",
1095   "Estiagem e Seca": "circle",
1096   "Granizo ": "hexagon ",
1097   "Incendio Florestal": "star",
1098   "Inundacoes": "triangle ",
1099   "Movimento de Massa": "cross",
1100   "Onda de Calor e Baixa Umidade": "circle",
1101   "Onda de Frio": "circle",
1102   "Outros": "cross",
1103   "Rompimento/Colapso de barragens": "cross",
1104   "Tornado": "hexagon",
1105   "Vendavais e Ciclones": "hexagon"
1106 });
1107
1108 var S2ID\\_estilizado = S2ID\\_filtrado.map(function(feature) {
1109   var grupo = ee.String(feature.get("GrupoDesa")).trim(); // Normaliza texto
1110   var descricao = ee.String(feature.get("DescrTipo")).trim(); // Normaliza
1111   texto
1112   var cor = coresDesastres.get(grupo, "gray"); // Usa cinza se nao encontrar
1113   no dicionario
1114   var forma = formasDesastres.get(descricao, "circle"); // Usa circulo se nao
1115   encontrar no dicionario
1116
1117   return feature.set({
1118     "style": {
1119       "color": cor,
1120       "pointSize": 6,
1121       "pointShape": forma,
1122       "width": 1.5
1123     }
1124   });
1125 });
1126
1127 // Atualizando o painel com os valores arredondados
1128 MeanPRP.evaluate(function(val1) {
1129   MeanPET.evaluate(function(val2) {
1130     MeanBW.evaluate(function(val3) {
1131       atualizarPainelEstatisticas(
1132         Math.round(val1 || 0),
1133         Math.round(val2 || 0),
1134         Math.round(val3 || 0)
1135       );
1136     });
1137   });
1138 });

```

```

1139 // Exibir contorno da ROI
1140 var contour = paintROIContour(roi, 'black', 1);
1141 Map.addLayer(contour, {color: 'black'}, 'Mesorregiao hidrografica - ' + bacia)
1142 ;
1143 Map.addLayer(BW\\_1, balanceVis, 'Balanço Hidrico em ' + end\\_ee\\_date.
1144   format('MM-YYYY').getInfo());
1145 Map.addLayer(PET\\_1, petVis, 'Evapotranspiracao em ' + end\\_ee\\_date.format
1146   ('MM-YYYY').getInfo());
1147 Map.addLayer(PRP\\_1, PrecipitationVis, 'Precipitacao em ' + end\\_ee\\_date.
1148   format('MM-YYYY').getInfo());
1149
1150 Map.addLayer(REFL\\_Current.select(name\\_NDVI), {
1151   min: estatisticas\\_NDVI.get('NDVI\\_min').getInfo(),
1152   max: estatisticas\\_NDVI.get('NDVI\\_max').getInfo(),
1153   palette: ['red', 'orange', 'yellow', 'green']
1154 }, 'NDVI ' + end\\_ee\\_date.format('MM-YYYY').getInfo());
1155
1156 Map.addLayer(vegetationIndices.NDVI\\_P, speiVis, 'NDVI-P ' + end\\_ee\\_date.
1157   format('MM-YYYY').getInfo());
1158
1159 Map.addLayer(REFL\\_Current.select(name\\_EVI), {
1160   min: estatisticas\\_EVI.get('EVI\\_min').getInfo(),
1161   max: estatisticas\\_EVI.get('EVI\\_max').getInfo(),
1162   palette: ['red', 'orange', 'yellow', 'green']
1163 }, 'EVI ' + end\\_ee\\_date.format('MM-YYYY').getInfo());
1164
1165 Map.addLayer(vegetationIndices.EVI\\_P, speiVis, 'EVI-P ' + end\\_ee\\_date.
1166   format('MM-YYYY').getInfo());
1167
1168 Map.addLayer(REFL\\_Current.select(name\\_NDMI), {
1169   min: estatisticas\\_NDMI.get('NDMI\\_min').getInfo(),
1170   max: estatisticas\\_NDMI.get('NDMI\\_max').getInfo(),
1171   palette: ['white', 'gray', 'cyan', 'blue']},
1172   'NDMI ' + end\\_ee\\_date.format('MM-YYYY').getInfo());
1173
1174 Map.addLayer(vegetationIndices.NDMI\\_P, speiVis, 'NDMI-P ' + end\\_ee\\_date.
1175   format('MM-YYYY').getInfo());
1176
1177 Map.addLayer(SPI\\_2M, speiVis, 'SPI-2 Z-SCORE ' + start\\_ee\\_date\\_2M.
1178   format('MM-YYYY').getInfo() + ' a ' + end\\_ee\\_date.format('MM-YYYY').
1179   getInfo());
1180 Map.addLayer(SPI\\_G, speiVis, 'SPI-2 Gamma ' + start\\_ee\\_date\\_2M.format
1181   ('MM-YYYY').getInfo() + ' a ' + end\\_ee\\_date.format('MM-YYYY').getInfo())
1182 ;
1183
1184 Map.addLayer(SPEI\\_3M, speiVis, 'SPEI-3 Z-SCORE ' + start\\_ee\\_date\\_3M.
1185   format('MM-YYYY').getInfo() + ' a ' + end\\_ee\\_date.format('MM-YYYY').
1186   getInfo());
1187 Map.addLayer(SPEI\\_G, speiVis, 'SPEI-3 Gamma ' + start\\_ee\\_date\\_3M.
1188   format('MM-YYYY').getInfo() + ' a ' + end\\_ee\\_date.format('MM-YYYY').
1189   getInfo());
1190
1191 // Definir a paleta de cores
1192 var speiPaleta = [
1193   "\\#824 B09", // Seca Extrema

```

```

1180     "\\# C28633 ", // Seca Seve ra
1181     "\\# DCBC75 ", // Seca Mod erada
1182     "\\# BFA475 ", // Seca Leve
1183     "\\# FFFFFFF ", // Neutro
1184     "\\#79 FFBC ", // Umidade Leve
1185     "\\#79 C8BC ", // Umidade Moderada
1186     "\\#3 B9B93 ", // Umidade Alta
1187     "\\#015 F56 " // Umidade Extrema
1188 ];
1189
1190 Map.addLayer(IIHV, speiVis, 'IIHV ' + end\\_ee\\_date.format('MM-YYYY').
    getInfo ());
1191 // Adicionar a imagem reclassificada ao mapa
1192 Map.addLayer(IIHVClassificada, {min: 1, max: 9, palette: speiPaleta}, "IIHV
    Classificado " + end\\_ee\\_date.format('MM-YYYY').getInfo ());
1193
1194
1195
1196 //print('IIHV atualizado para:', bacia, ano, mes, 'G:', G, 'U:', U, 'T');
1197
1198 // Adicionar ao mapa com o estilo aplicado
1199 Map.addLayer(S2ID\\_estilizado.style ({styleProperty: "style"}), {}, "Registros
    de eventos de desastres no S2ID");
1200
1201 }
1202
1203
1204 // Botao para atualizar a visualizacao
1205 var botaoAtualizar = ui.Button({
1206     label: 'Atualizar IIHV',
1207     onClick: atualizarIIHV
1208 });
1209 painel.add ( botao Atualizar );
1210
1211 var PPGGRD = ui.Label({
1212     value: ' Programa de Pos-Graduacao em Gestao de Risco e Desastre na Amazonia (
        PPGGRD -IG-UFPA)',
1213     style: { fontSize: '12px', color: 'blue', textDecoration: 'underline' },
1214     targetUrl: 'https://ppggrd.propesp.ufpa.br/index.php/br/programa/apresentacao '
        // Substituir pelo link correto
1215 });
1216
1217 var desenvolvedor = ui.Label({
1218     value: ' Desenvolvedor: Elivaldo Carvalho Rocha',
1219     style: { fontSize: '12px', color: 'blue', textDecoration: 'underline' },
1220     targetUrl: 'https://l.instagram.com/?u=https\\%3A\\%2F\\%2Fbit.ly\\%2F3AbWbCu
        \\%3Ffbclid=\\%3DPAZXh0bgNhZW0CMTEAAaY7aUFAq-JINPDf324acER8J6elkdQDfHrpwJkar8nnzUHDRJPCI4j8-I\\_aem\\
        _PhFOSd5W3iXVtoGy31tsnQ\\&e=AT3o-yfwY5vWs\\_pudXbCq6XAbxkPf-XH9EJCCUPKpHGJ766Sf2puXsJYRTLktfzT-Kq4-c\\
        _mgZe1Dh3GhfBjnFANgCGGKLvwL8O3bpQb1ezpsZtFgnEWmA' // Substituir pelo link
        correto
1221 });
1222
1223 var orientador = ui.Label({
1224     value: ' Orientador: Prof. Dr. Joao de Athaydes Silva Junior',

```

```

1225     style: { fontSize: '12px', color: 'blue', textDecoration: 'underline' },
1226     targetUrl: 'https://ppggrd.proresp.ufpa.br/index.php/br/programa/coordenacao '
           // Substituir pelo link correto
1227 });
1228
1229 var coorientador = ui.Label({
1230     value: 'Coorientador: Prof. Dr. Everaldo Barreiros de Souza',
1231     style: { fontSize: '12px', color: 'blue', textDecoration: 'underline' },
1232     targetUrl: 'http://lattes.cnpq.br/6257794694839685' // Substituir pelo link
           correto
1233 });
1234
1235 // Adicionando os labels ao painel
1236 painelAutores.add(PPGGRD);
1237 painelAutores.add(desenvolvedor);
1238 painelAutores.add(orientador);
1239 painelAutores.add(coorientador);
1240
1241 // Adicionar o painel ao painel principal
1242 painel.add(painelAutores);
1243
1244 // Texto de agradecimento ao Google Earth Engine
1245 var agradecimentoGEE = ui.Label({
1246     value: 'Agradecimento: O desenvolvimento do aplicativo IIHV só foi possível
           graças a plataforma Google Earth Engine (GEE), que fornece acesso gratuito a
           dados de sensoriamento remoto e ferramentas avançadas de processamento
           geoespacial. \n\n' +
1247         'Agradecemos a equipe do GEE por disponibilizar essa poderosa
           infraestrutura computacional, permitindo análises ambientais e climáticas em
           larga escala de maneira acessível e eficiente.',
1248     style: {
1249         fontSize: '12px',
1250         margin: '10px 0',
1251         textAlign: 'justify'
1252     }
1253 });
1254
1255 // Adicionar ao painel principal
1256 painel.add(agradecimentoGEE);
1257
1258
1259 // Adiciona o painel ao mapa
1260 ui.root.insert(0, painel);
1261
1262 ///////////////////////////////////////////////////
1263 // Criar um painel de legenda
1264 var legenda = ui.Panel({
1265     style: {
1266         position: 'bottom-right',
1267         padding: '8px',
1268         backgroundColor: 'white'
1269     }
1270 });
1271
1272
1273 // Adicionar título a legenda

```

```

1274 var titulo = ui.Label({
1275     value: 'Grupo e Descricao de Tipologia de Desastres',
1276     style: {
1277         fontWeight: 'bold',
1278         fontSize: '14px',
1279         margin: '0px 0px 4px 0px'
1280     }
1281 });
1282
1283 legenda.add(titulo);
1284
1285 // Dicionario de cores para os grupos de desastre
1286 var coresDesastres = {
1287     "Climatologico": "orange",
1288     "Hidrologico": "blue",
1289     "Meteorologico": "green",
1290     "Outros": "red"
1291 };
1292
1293 // Adicionar cores dos grupos de desastre na legenda
1294 Object.keys(coresDesastres).forEach(function(grupo) {
1295     var cor = coresDesastres[grupo];
1296
1297     var simbolo = ui.Label({
1298         value: '', // Um circulo para representar a cor
1299         style: {
1300             color: cor,
1301             fontSize: '16px',
1302             margin: '0px'
1303         }
1304     });
1305
1306     var descricao = ui.Label({
1307         value: grupo,
1308         style: {
1309             fontSize: '12px',
1310             margin: '0px 0px 4px 4px'
1311         }
1312     });
1313
1314     var linha = ui.Panel({
1315         widgets: [simbolo, descricao],
1316         layout: ui.Panel.Layout.Flow('horizontal')
1317     });
1318
1319     legenda.add(linha);
1320 });
1321
1322 // Dicionario de formas para os tipos de desastre
1323 var formasDesastres = {
1324     "Alagamentos": "",
1325     "Chuvas Intensas": "",
1326     "Doencas infecciosas": "",
1327     "Enxurradas": "",
1328     "Erosao": "",
1329     "Estiagem e Seca": "",

```

```

1330 "Granizo": "",
1331 "Incendio Florestal": "",
1332 "Inundacoes": "",
1333 "Movimento de Massa": "",
1334 "Onda de Calor e Baixa Umidade": "",
1335 "Onda de Frio": "",
1336 "Outros": "",
1337 "Rompimento/Colapso de barragens": "",
1338 "Tornado": "",
1339 "Vendavais e Ciclones": ""
1340 };
1341
1342 // Adicionar formas dos tipos de desastre na legenda
1343 Object.keys( formasDesastres ).forEach ( function ( descricao ) {
1344     var simbolo = formasDesastres[descricao];
1345
1346     var simboloLabel = ui.Label({
1347         value: simbolo,
1348         style: {
1349             fontSize: '16px',
1350             margin: '0px'
1351         }
1352     });
1353
1354     var descricaoLabel = ui.Label({
1355         value: descricao,
1356         style: {
1357             fontSize: '12px',
1358             margin: '0px 0px 4px 4px'
1359         }
1360     });
1361
1362     var linha = ui.Panel({
1363         widgets: [simboloLabel, descricaoLabel],
1364         layout: ui.Panel.Layout.Flow('horizontal')
1365     });
1366
1367     legenda.add( linha );
1368 });
1369
1370 // Adicionar a legenda ao mapa
1371 Map.add( legenda );
1372
1373 ///////////////////////////////////////////////////
1374 // Criar um objeto de visualizacao para IIHV
1375 var iihvVis = {
1376     min: -2.5,
1377     max: 2.5,
1378     palette: [
1379         "\\#824B09", // Seca Extrema
1380         "\\#C28633", // Seca Severa
1381         "\\#DCBC75", // Seca Moderada
1382         "\\#BFA475", // Seca Leve
1383         "\\#FFFFFF", // Neutro
1384         "\\#79FFBC", // Umidade Leve
1385         "\\#79C8BC", // Umidade Moderada

```

```

1386     "\\#3 B9B93", // Umidade Alta
1387     "\\#015 F56" // Umidade Extrema
1388 ]
1389 };
1390
1391 // Legend Stuff
1392
1393 //LEGEND VERSION 1 (Horizontal, Centered, position is not easily changed)
1394 // Source: https://gis.stackexchange.com/questions/421937/customizing-a-
1395           continuous-legend-in-google-earth-engine
1396
1397 // Creates a 7-step color bar thumbnail image for use in legend from the given
1398 // color palette
1399 function makeColorBarParams(palette) {
1400     return {
1401         bbox: [0, 0, 9, 0.1], // Ajustado para 9 cores (0 a 8)
1402         dimensions: '150x10', // ajustar as dimensoes para caber todas as classes se
1403                               // necessario
1404         format: 'png',
1405         min: 0,
1406         max: 8, // Ajustado para refletir as 9 cores da paleta
1407         palette: iihvVis.palette,
1408     };
1409 }
1410
1411 // Create the colour bar for the legend
1412 var colorBar = ui.Thumbnail({
1413     image: ee.Image.pixelLonLat().select('longitude').int(),
1414     params: makeColorBarParams(iihvVis.palette),
1415     style: {position: 'bottom-left', stretch: 'horizontal', margin: '0px 8px',
1416           maxHeight: '24px'},
1417 });
1418
1419 // Create a panel with three numbers for the legend
1420 var legendLabels = ui.Panel({
1421     widgets: [
1422         ui.Label(iihvVis.min, {margin: '4px 8px'}),
1423         ui.Label(
1424             ((iihvVis.max-iihvVis.min) / 2+iihvVis.min),
1425             {margin: '4px 8px', textAlign: 'center', stretch: 'horizontal'}),
1426         ui.Label(iihvVis.max, {margin: '4px 8px'})
1427     ],
1428     layout: ui.Panel.Layout.flow('horizontal')
1429 });
1430
1431 // Legend title
1432 var legendTitle = ui.Label({
1433     //value: 'Classes IIHV',
1434     value: null,
1435     style: {fontWeight: 'bold'}
1436 });
1437
1438 // Add the legendPanel to the map
1439 var legendPanel3 = ui.Panel([legendTitle, colorBar, legendLabels]);
1440 Map.add(legendPanel3);

```

Algoritmo de processamento do IIHV no GEE.

**APÊNDICE B – PLATAFORMA DE MONITORAMENTO IIHV — PRODUTO
TÉCNICO**

PLATAFORMA DE MONITORAMENTO IIHV (GOOGLE EARTH ENGINE)

PRODUTO TÉCNICO-TECNOLÓGICO DA PESQUISA

ELIVALDO CARVALHO ROCHA
PROF. DR. JOÃO DE ATHAYDES SILVA JUNIOR
PROF. DR. EVERALDO BARREIROS DE SOUZA

BELÉM – PA
2026

Produto Técnico vinculado a Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Gestão de Riscos e Desastres na Amazônia, do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará, em cumprimento às exigências para obtenção do título de Mestre em Gestão de Riscos e Desastres Naturais na Amazônia.

APRESENTAÇÃO

Este produto técnico-tecnológico consiste em uma plataforma web interativa de monitoramento ambiental, desenvolvida no ambiente de computação em nuvem Google Earth Engine (GEE). A ferramenta implementa o Índice Integrado de Hidrometeorologia e Vegetação (IIHV), permitindo a análise retrospectiva e o monitoramento de eventos hidrometeorológicos extremos na Mesorregião Hidrográfica do Rio Madeira para o período de 2003 a 2023.

Metodologia: O desenvolvimento utilizou lógica de programação em JavaScript para integrar quatro indicadores ambientais distintos: dois meteorológicos (SPI_2 e $SPEI_3$) e dois de vegetação (EVI_P e $NDMI_P$). A integração desses dados é realizada por meio da Matriz GUT (Gravidade, Urgência e Tendência), que permite a ponderação dinâmica dos pesos de cada variável, convertendo anomalias climáticas e biofísicas em classes de severidade que variam de "Seca Extrema" a "Umidade Extrema".

Aplicabilidade: A plataforma foi desenhada como um Sistema de Suporte à Decisão (SSD), sendo aplicável em salas de situação da Defesa Civil, órgãos gestores de recursos hídricos e secretarias de meio ambiente. Suas funcionalidades permitem identificar antecipadamente o início de secas severas (como a de 2023) ou a consolidação de cheias históricas (como a de 2014), facilitando o planejamento de ações de mitigação e a decretação de situações de emergência baseadas em evidências geoespaciais.

Para obter mais detalhes do produto técnico procure a dissertação **"ÍNDICE INTEGRADO DE HIDROMETEOROLOGIA E VEGETAÇÃO (IIHV): VALIDAÇÃO NA MESORREGIÃO HIDROGRÁFICA DO RIO MADEIRA"** defendida no ano de 2025, que se encontra depositada no Repositório Virtual da Universidade Federal do Pará e/ou na página do Programa de Pós-Graduação em Gestão de Riscos e Desastres na Amazônia.

MANUAL DE USO DA PLATAFORMA IIHV

O Índice Integrado de Hidrometeorologia e Vegetação (IIHV) permite a análise integrada das condições hidrometeorológicas e vegetacionais, fornecendo uma avaliação detalhada sobre a disponibilidade hídrica e os impactos das secas na vegetação. A ferramenta auxilia na identificação de padrões de seca e umidade para suporte à gestão de riscos e desastres naturais.



Instruções de Operação:

Para realizar a análise de uma determinada área e período, siga os passos abaixo no painel de controle da plataforma:

- Seleção da Bacia Hidrográfica:** Selecione a unidade espacial de interesse (Mesorregiões Hidrográficas da Amazônia) disponível no menu suspenso à esquerda.
- Definição Temporal:** Escolha o Ano (disponível entre 2003 e 2023) e o Mês desejado para a análise.
- Parametrização da Matriz GUT:** Ajuste os pesos para cada dimensão conforme o foco da sua gestão:
 - Gravidade (G):** Representa a resposta da vegetação (EVI/NDMI). Peso sugerido: 1.
 - Urgência (U):** Representa a precipitação de curto prazo (SPI). Peso sugerido: 2.

- **Tendência (T):** Representa o balanço hídrico climático (SPEI).
Peso sugerido: **3**.
4. **Processamento:** Clique no botão de atualização para que o Google Earth Engine realize o cálculo em nuvem e renderize o mapa classificado e os gráficos estatísticos de área afetada.

REGISTRO DE PROPRIEDADE INTELECTUAL

Este software encontra-se registrado e depositado no repositório internacional Zenodo, garantindo a proteção da autoria e a titularidade vinculada ao PPGGRD-UFPA. O registro possui identificador digital único para citação acadêmica:

DOI: 10.5281/zenodo.17778981

Link da Plataforma (GEE):

<https://carvalhovaldo09.users.earthengine.app/view/iihv-ppggrd-ig-ufpa>