



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUÍ  
FACULDADE DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

LUANDRA CAROLINE VELOSO FERREIRA

**MUDANÇAS NO REGIME DE CHUVAS E IMPLICAÇÕES PARA A EROSÃO  
HÍDRICA NA BACIA DO TAPAJÓS**

TUCURUÍ - PA

2026

LUANDRA CAROLINE VELOSO FERREIRA

**MUDANÇAS NO REGIME DE CHUVAS E IMPLICAÇÕES PARA A EROSÃO  
HÍDRICA NA BACIA DO TAPAJÓS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Sanitária e Ambiental, do Campus Universitário de Tucuruí, da Universidade Federal do Pará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharela em Engenharia Sanitária e Ambiental.

Orientador(a): Prof. Dr. Carlos Eduardo Aguiar de Souza Costa.

TUCURUÍ - 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)**

---

V432m Veloso Ferreira, Luandra Caroline.  
MUDANÇAS NO REGIME DE CHUVAS E IMPLICAÇÕES  
PARA A EROSÃO HÍDRICA NA BACIA DO TAPAJÓS /  
Luandra Caroline Veloso Ferreira. — 2026.  
54 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Carlos Eduardo Aguiar de Souza Costa  
Trabalho de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Pará,  
Campus Universitário de Tucuruí, Faculdade de Engenharia  
Sanitária e Ambiental, Tucuruí, 2026.

1. Erosividade. 2. IAC. 3. Mudanças Climáticas. 4. IDW.  
5. Tapajós. I. Título.

CDD 620

---

LUANDRA CAROLINE VELOSO FERREIRA


**MUDANÇAS NO REGIME DE CHUVAS E IMPLICAÇÕES PARA A EROSÃO  
HÍDRICA NA BACIA DO TAPAJÓS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Sanitária e Ambiental, do Campus Universitário de Tucuruí, da Universidade Federal do Pará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharela em Engenharia Sanitária e Ambiental.

Data da aprovação: 21/01/2026


Conceito: Excelente

**BANCA EXAMINADORA**

Documento assinado digitalmente  
 **CARLOS EDUARDO AGUIAR DE SOUZA COSTA**  
Data: 27/01/2026 11:23:57-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


---

Prof. Dr. Carlos Eduardo Aguiar de Souza Costa – Orientador  
UFPA/CAMTUC/FAESA

Documento assinado digitalmente  
 **ARISTIDES ANDERSON PEREIRA REIS**  
Data: 27/01/2026 06:34:41-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Me. Aristides Anderson Pereira Reis – Avaliador interno  
UFPA/CAMTUC/FAESA

Documento assinado digitalmente  
 **CAROLINA COSTA RAMOS**  
Data: 27/01/2026 10:28:53-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Profª. Ma. Carolina Costa Ramos – Avaliadora externa  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Estado do Pará

## AGRADECIMENTOS

Acima de tudo, expresso minha gratidão a Deus pelo dom da vida e pela saúde que me permitiram chegar até este momento, concretizando o sonho de infância de tornar-me engenheira. À minha mãe, devo reconhecimento profundo pelo apoio incondicional, pela dedicação e pelos esforços incansáveis que possibilitaram minha trajetória acadêmica. Ao meu marido, agradeço pela presença constante, pelo companheirismo e pela força que me sustentaram ao longo desta jornada, sempre acreditando em meu potencial.

Estendo minha gratidão ao meu pai, exemplo e referência profissional, cujo incentivo foi essencial para minha formação. Aos meus sogros, familiares e amigos que torceram por mim, registro meu sincero agradecimento. Às colegas de faculdade, que compartilharam comigo cinco anos de convivência, deixo o reconhecimento pelas experiências e memórias que permanecerão como parte significativa desta etapa da vida.

Ao meu orientador, que se tornou verdadeiro mentor desde sua chegada à universidade, agradeço pela orientação dedicada e pelo apoio constante, fundamentais para meu crescimento acadêmico e para a realização deste trabalho. Reconheço também a contribuição de todos os professores da graduação, que foram pilares de minha formação, em especial o professor Cesar Juan, cuja solicitude em momentos decisivos marcou minha trajetória.

De forma especial, agradeço à amiga Moyanne, companheira desde o primeiro dia de aula, pela parceria, apoio e pelas emoções compartilhadas, que tornaram esta caminhada mais leve e significativa. Registro também minha gratidão ao professor e amigo Mayke e a minha amiga Winnie, que ofereceram suporte e incentivo nos momentos necessários.

Por fim, agradeço a mim mesma pela resiliência diante das dificuldades, pela coragem de não desistir e pela determinação em acreditar que seria possível chegar até aqui.

## RESUMO

Este trabalho teve como objetivo analisar o comportamento presente e futuro do regime de chuvas e o potencial erosivo das precipitações na Bacia Hidrográfica do Rio Tapajós (BHRT), considerando diferentes contextos climáticos. Foram utilizados dados históricos de precipitação de dez estações pluviométricas distribuídas na bacia, bem como projeções climáticas do modelo MIROC5 para os cenários futuros RCP 4.5 e RCP 8.5. A variabilidade pluviométrica foi avaliada por meio do Índice de Anomalia da Chuva (IAC), enquanto o potencial erosivo das chuvas foi estimado a partir de equações empíricas ajustadas às condições regionais, com destaque para a adoção da equação de Morais et al. (1991). A análise espacial da erosividade média anual foi realizada utilizando o método de interpolação Inverso da Distância Ponderada (IDW). Os resultados para o período presente evidenciaram alternância entre anos extremamente úmidos e extremamente secos em todas as estações analisadas, indicando elevada variabilidade climática na BHRT. Observou-se que os maiores valores de erosividade mensal ocorreram durante o período chuvoso, concentrando-se, de modo geral, entre os meses de novembro e março no Mato Grosso e entre janeiro e maio nas estações localizadas na Amazônia. Nos cenários futuros, manteve-se o padrão sazonal da erosividade, porém com intensificação dos valores máximos, especialmente no cenário RCP 8.5. A análise do IAC indicou aumento da frequência e da severidade de eventos extremos, com maior recorrência de secas severas em algumas estações e intensificação de episódios chuvosos em outras, evidenciando contrastes espaciais dentro da bacia. A relação entre o IAC e a erosividade demonstrou coerência ao longo dos períodos analisados, indicando que anos classificados como extremamente úmidos tendem a apresentar maior número de meses com elevada erosividade, enquanto anos extremamente secos concentram predominantemente meses com baixo potencial erosivo. A interpolação espacial revelou maior concentração de erosividade nas porções oeste e norte da BHRT, associada a maiores volumes e intensidades de precipitação. O principal resultado do estudo indica que, embora o padrão sazonal das chuvas seja mantido nos cenários futuros, há tendência de intensificação do potencial erosivo, sobretudo no cenário RCP 8.5, ampliando os riscos de erosão hídrica na Bacia do Tapajós.

**Palavras-chave:** Erosividade; IAC; Mudanças Climáticas; IDW; Tapajós.

## ABSTRACT

This study aimed to analyze the present and future behavior of rainfall patterns and the erosive potential of precipitation in the Tapajós River Basin (BHRT), considering different climatic contexts. Historical precipitation data from ten rain gauge stations distributed throughout the basin were used, as well as climate projections from the MIROC5 model for the future scenarios RCP 4.5 and RCP 8.5. Rainfall variability was assessed using the Rainfall Anomaly Index (RAI), while the erosive potential of rainfall was estimated from empirical equations adjusted to regional conditions, with emphasis on the adoption of the equation by Morais et al. (1991). The spatial analysis of the average annual erosivity was performed using the Inverse Distance Weighted (IDW) interpolation method. The results for the present period showed an alternation between extremely wet and extremely dry years in all stations analyzed, indicating high climatic variability in the BHRT. It was observed that the highest monthly erosivity values occurred during the rainy season, generally concentrated between November and March in Mato Grosso and between January and May in stations located in the Amazon. In future scenarios, the seasonal pattern of erosivity was maintained, but with an intensification of maximum values, especially in the RCP 8.5 scenario. The IAC analysis indicated an increase in the frequency and severity of extreme events, with a greater recurrence of severe droughts in some stations and an intensification of rainy episodes in others, highlighting spatial contrasts within the basin. The relationship between the IAC and erosivity showed consistency throughout the analyzed periods, indicating that years classified as extremely wet tend to have a greater number of months with high erosivity, while extremely dry years predominantly concentrate months with low erosive potential. Spatial interpolation revealed a greater concentration of erosivity in the western and northern portions of the BHRT, associated with higher volumes and intensities of precipitation. The main finding of the study indicates that, although the seasonal rainfall pattern is maintained in future scenarios, there is a tendency for intensification of the erosive potential, especially in the RCP 8.5 scenario, increasing the risks of water erosion in the Tapajós Basin.

**Keywords:** Erosivity; IAC; Climate Change; IDW; Tapajós.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Mapa de localização da BHRT.....	21
Figura 2 - Mapa de determinação do fator energético da chuva.....	24
Figura 3 - Comportamento do IAC nas estações analisadas para o presente.....	28
Figura 4 - Comportamento do IAC nas estações analisadas para o cenário 4.5 .....	30
Figura 5 - Comportamento do IAC nas estações analisadas para o cenário 8.5 .....	32
Figura 6 - Distribuição mensal da erosividade da chuva nas estações pluviométricas analisadas para o presente .....	35
Figura 7 - Distribuição mensal da erosividade da chuva nas estações pluviométricas analisadas para o cenário 4.5.....	37
Figura 8 - Distribuição mensal da erosividade da chuva nas estações pluviométricas analisadas para o cenário 8.5.....	39
Figura 9 - Mapa de interpolação espacial de Erosividade da chuva anual pelo método IWD .	48

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Estações pluviométricas .....	22
Tabela 2 – Classificação da Erosividade da Chuva .....	25
Tabela 3 - Classificação do índice de anomalia da chuva (IAC).....	26
Tabela 4 – Média anual de Erosividade da BHRT .....	48

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Equações de Erosividade da Chuva.....	25
Quadro 2 - Relação do IAC e Erosividade para o presente .....	41
Quadro 3 - Relação IAC e Erosividade para o futuro no cenário 4.5 .....	43
Quadro 4 - Relação IAC e Erosividade para o futuro no cenário 8.5 .....	45

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas
BHRT	Bacia Hidrográfica do Rio Tapajós
GCM	Modelos de Circulação Geral
IAC	Índice de Anomalia da Chuva
IDW	Inverso da Distância Ponderada
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
MFI	Índice de Fournier Modificado
MIROC 5	Model for Interdisciplinary Research on Climate 5
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
RCP	Representative Concentration Pathways
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>14</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivos -----</b>	<b>16</b>
1.1.1	Geral.....	16
1.1.2	Específicos .....	16
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>17</b>
<b>2.1</b>	<b>Mudanças climáticas e intensificação do regime de chuvas -----</b>	<b>17</b>
<b>2.2</b>	<b>Variabilidade pluviométrica e riscos associados -----</b>	<b>17</b>
<b>2.3</b>	<b>Potencial erosivo das chuvas -----</b>	<b>18</b>
<b>2.4</b>	<b>O Índice de Anomalia da Chuva aplicado ao monitoramento climático-----</b>	<b>18</b>
<b>2.5</b>	<b>Interpolação espacial aplicada à climatologia -----</b>	<b>19</b>
<b>2.6</b>	<b>Projeções futuras de chuva e cenários climáticos-----</b>	<b>19</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>21</b>
<b>3.1</b>	<b>Caracterização da Área de Estudo-----</b>	<b>21</b>
<b>3.2</b>	<b>Model for Interdisciplinary Research on Climate 5 (MIROC5)-----</b>	<b>22</b>
<b>3.3</b>	<b>Erosividade da chuva -----</b>	<b>23</b>
<b>3.4</b>	<b>Índice de anomalia da chuva (IAC)-----</b>	<b>25</b>
<b>3.5</b>	<b>Inverse Distance Weighting (IDW) -----</b>	<b>26</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>27</b>
<b>4.1</b>	<b>IAC -----</b>	<b>27</b>
4.1.1	Presente .....	27
<b>4.1.2</b>	<b>Cenário RCP 4.5 .....</b>	<b>29</b>
4.1.3	Cenário RCP 8.5 .....	31
<b>4.2</b>	<b>Erosividade da Chuva -----</b>	<b>34</b>
4.2.1	Presente .....	34
4.2.2	Cenário RCP 4.5 .....	36

4.2.3	Cenário RCP 8.5 .....	38
4.3	<b>Relação entre IAC e Erosividade</b> -----	<b>40</b>
4.4	<b>IDW</b> -----	<b>47</b>
5	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>50</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>51</b>

## 1 INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas têm intensificado o ciclo hidrológico global, promovendo alterações significativas na distribuição espacial e temporal das precipitações. Em algumas regiões, observa-se o aumento da frequência de eventos extremos de chuva, enquanto em outras prevalecem períodos prolongados de estiagem, resultando em impactos diretos sobre os sistemas ambientais e sociais (IPCC, 2023). No Brasil, os eventos extremos de precipitação são considerados a principal causa de desastres naturais, como enchentes e deslizamentos, que acarretam perdas humanas e materiais (Monte et al., 2021). Além disso, chuvas intensas possuem elevado potencial erosivo, contribuindo para a degradação dos solos e para o assoreamento de rios, o que compromete a qualidade dos recursos hídricos e a infraestrutura instalada (Teixeira et al., 2023).

A erosão hídrica é um processo natural que se intensifica diante da ação de chuvas concentradas e de alta intensidade. O impacto das gotas de chuva sobre o solo promove a desagregação das partículas, favorecendo o escoamento superficial e o transporte de sedimentos (Riquetti et al., 2020). Esse fenômeno é especialmente relevante na Amazônia, onde os solos apresentam baixa fertilidade e elevada vulnerabilidade à erosão, agravada pelos altos volumes de precipitação anuais (Wang et al., 2024). Estudos recentes destacam que o uso inadequado da terra, aliado às mudanças climáticas, intensifica os processos erosivos e compromete a sustentabilidade dos ecossistemas amazônicos (Oliveira et al., 2025).

A Bacia Hidrográfica do Rio Tapajós (BHRT) é uma das maiores do Brasil e desempenha papel estratégico tanto na geração de energia elétrica quanto no transporte hidroviário de grãos (Silva et al., 2018). Essa bacia enfrenta pressões crescentes decorrentes de atividades como garimpo, agricultura e grandes projetos de infraestrutura, que ampliam os riscos ambientais e sociais (Carvalho et al., 2022). A variabilidade pluviométrica na região amazônica é fortemente influenciada por sistemas oceano-atmosféricos de grande escala, como a Zona de Convergência Intertropical, que condiciona a sazonalidade das chuvas e, conseqüentemente, os processos erosivos (Nery; Siqueira, 2020). Assim, a análise da erosividade da chuva e de índices climatológicos, como o Índice de Anomalia da Chuva (IAC), é fundamental para caracterizar os padrões hidrológicos da BHRT e antecipar possíveis cenários de risco (Silva et al., 2022).

O Índice de Anomalia da Chuva (IAC) tem se consolidado como uma ferramenta eficiente para avaliar a intensidade e a duração de períodos secos e úmidos, permitindo identificar anomalias positivas e negativas de forma simples e objetiva (Nery; Siqueira, 2020).

Sua aplicação em estudos climatológicos possibilita diagnósticos precisos sobre a variabilidade das chuvas e auxilia na prevenção de impactos socioambientais decorrentes de eventos extremos (Silva et al., 2022). Paralelamente, a erosividade da chuva, medida por índices específicos, fornece informações sobre o potencial de degradação dos solos e sobre os riscos associados ao transporte de sedimentos, sendo um indicador essencial para a gestão dos recursos hídricos e para o planejamento territorial (Costa; Blanco, 2018; Teixeira et al., 2023).

As projeções futuras de precipitação, elaboradas a partir de modelos climáticos globais (GCMs) permitem avaliar cenários de mudanças climáticas e seus impactos regionais. Os cenários RCPs (Representative Concentration Pathways), propostos pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), representam diferentes trajetórias de emissões de gases de efeito estufa e seus efeitos sobre o balanço radiativo da Terra (Aleman et al., 2017). Entre eles, o RCP 4.5 é considerado um cenário intermediário, associado a políticas de mitigação, enquanto o RCP 8.5 é reconhecido como o mais pessimista, refletindo altas emissões e maior probabilidade de ocorrência (Rocha; Correia; Gomes, 2019). A utilização desses cenários em estudos regionais possibilita compreender como a BHRT poderá responder às mudanças climáticas, especialmente em relação à erosividade das chuvas e à variabilidade pluviométrica.

Diante desse contexto, este trabalho justifica-se pela necessidade de ampliar o conhecimento sobre os padrões de precipitação e seu potencial erosivo na Bacia Hidrográfica do Rio Tapajós, colaborando com estudos futuros e fornecendo subsídios para prever possíveis urgências climáticas que a região possa enfrentar. Este estudo está alinhado aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente ao ODS 6 (Água potável e saneamento), ODS 13 (Ação contra a mudança global do clima) e ODS 15 (Vida terrestre) e contribuindo para estratégias de adaptação e mitigação dos riscos ambientais na Amazônia.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Geral**

Avaliar o comportamento presente e futuro das chuvas e seu potencial erosivo na Bacia Hidrográfica do Rio Tapajós, considerando cenários climáticos RCP 4.5 e RCP 8.5, e analisando tendências temporais e espaciais associadas.

### **1.1.2 Específicos**

- Calcular e analisar a erosividade da chuva
- Calcular e analisar o Índice de anomalia da chuva (IAC) para o presente e para as projeções futuras de precipitação;
- Representar espacialmente os resultados da por meio da técnica de interpolação IDW;
- Avaliar comparativamente o IAC e a erosividade da chuva no presente e sob os cenários de projeção futuras.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 Mudanças climáticas e intensificação do regime de chuvas**

O aumento da concentração de gases de efeito estufa tem promovido alterações estruturais no sistema climático global, modificando padrões de precipitação em diversas regiões. Esse processo decorre do maior aquecimento da superfície terrestre e marinha, intensificando mecanismos atmosféricos responsáveis pelo transporte de umidade (IPCC, 2023). Segundo Allen et al. (2019), temperaturas mais elevadas aumentam a capacidade de retenção de vapor d'água, resultando em eventos de precipitação intensa e maior energia para o desenvolvimento de tempestades. Alterações pluviométricas ocorrem de forma espacialmente heterogênea, ampliando vulnerabilidades ambientais e sociais em áreas tropicais.

A intensificação do ciclo hidrológico tem gerado maior frequência de eventos extremos, como chuvas convectivas severas, capazes de promover danos ao solo e às infraestruturas urbanas e rurais. Em países tropicais, os extremos de precipitação têm sido os principais responsáveis por perdas materiais, danos ambientais e interrupções de sistemas viários e produtivos (Monte et al., 2021). Assim, compreender o comportamento das chuvas sob cenários de mudanças climáticas é fundamental para subsidiar ações preventivas e adequação de políticas de gestão territorial.

Em áreas amazônicas, os impactos dos extremos tendem a ser potencializados devido à elevada incidência de precipitações anuais, associados à fragilidade intrínseca dos solos predominantes. Estudos indicam que oscilações na intensidade e duração das chuvas modificam processos hidrológicos, alterando recargas superficiais e subterrâneas e favorecendo desequilíbrios ecológicos (Oliveira et al., 2020; Rosa; Sousa, 2018). Esse fenômeno afeta diretamente a estabilidade dos sistemas ambientais e a resiliência da vegetação, criando cenários futuros preocupantes.

### **2.2 Variabilidade pluviométrica e riscos associados**

A variabilidade pluviométrica desempenha papel determinante nos processos erosivos e hidrológicos, uma vez que a distribuição temporal irregular da chuva altera taxas de infiltração e escoamento superficial. Períodos chuvosos concentrados aumentam significativamente o volume de enxurradas, elevando a capacidade de transporte de sedimentos e reduzindo a proteção do solo (Oliveira et al., 2021). Assim, a análise climatológica temporal é essencial para a definição de tendências sazonais e identificação de períodos críticos.

A vulnerabilidade decorrente da variabilidade pluviométrica intensifica-se quando associada a atividades humanas, como desmatamento, mineração e expansão agrícola.

Pesquisas revelam que a supressão vegetal tende a reduzir a rugosidade superficial do solo, ampliando a suscetibilidade ao escoamento concentrado e ao desprendimento de partículas (Carvalho et al., 2022). Esse processo torna áreas tropicais sujeitas a impactos erosivos severos.

Além disso, oscilações na chuva têm sido vinculadas a colapsos produtivos em setores rurais, envolvendo perdas agrícolas e prejuízos socioeconômicos. Bentes et al. (2018) mostram que, na Região Amazônica, os pequenos produtores são os mais afetados pelas variações no regime pluviométrico, pois dependem da regularidade das chuvas para a manutenção dos cultivos agrícolas e da pesca continental, atividades fundamentais para a subsistência e a geração de renda local. Mudanças na distribuição temporal e na intensidade das precipitações podem comprometer os ciclos produtivos, reduzir a oferta de alimentos e intensificar a insegurança alimentar.

### **2.3 Potencial erosivo das chuvas**

A erosividade é definida como a capacidade que a chuva tem de desprender partículas do solo e gerar escoamento superficial. Esse potencial depende de fatores como intensidade pluviométrica, distribuição intra-evento e duração dos episódios (Wang et al., 2024). As chuvas de alta energia cinética modificam a estrutura superficial dos solos, desagregando agregados e favorecendo o transporte lateral dos sedimentos. Assim, regiões com alta concentração de chuva em curto intervalo temporal apresentam maior sensibilidade ao processo erosivo.

Estudos recentes desenvolvidos no Brasil evidenciam a existência de padrões regionais de erosividade, os quais acompanham a dinâmica geográfica das precipitações. Pesquisas mostram que o Norte do Brasil possui índices elevados, influenciados pela forte atividade convectiva e pelo regime sazonal marcado (Teixeira et al., 2023). Esse padrão contribui para o assoreamento de corpos hídricos e perdas de fertilidade, afetando processos ecológicos e produtivos. Na Amazônia Central, a erosividade tem recebido destaque devido à interface entre mudanças climáticas e transformações no uso da terra. Pesquisas evidenciam a intensificação dos processos erosivos em áreas onde ocorreram substituições de vegetação natural por pastagens e áreas urbanizadas (Oliveira et al., 2025). Essa situação amplia os riscos ambientais, justificando análises específicas em bacias estratégicas, como a do rio Tapajós.

### **2.4 O Índice de Anomalia da Chuva aplicado ao monitoramento climático**

O Índice de Anomalia da Chuva (IAC) constitui uma ferramenta estatística destinada à identificação de desvios pluviométricos em relação às médias históricas. Sua aplicação permite caracterizar períodos secos e úmidos com facilidade interpretativa, representando grau de severidade e frequência (Nery; Siqueira, 2020). Estudos apontam sua eficiência para estudos hidrológicos, pois sintetiza flutuações de forma comparativa e temporalmente contínua.

A utilização do índice tem sido associada à predição de eventos extremos, permitindo alertar sistemas de gestão ambiental e proteção civil. Pesquisas demonstram que valores negativos sucessivos do índice constituem indicativo direto de estiagens prolongadas, com reflexos no abastecimento e produtividade agrícola (Silva et al., 2022). Assim, o IAC integra-se como instrumento estratégico para análises multianuais. Além disso, estudos têm vinculado séries de IAC a impactos erosivos, uma vez que ciclos de déficit hídrico seguidos de chuvas intensas favorecem o desprendimento estrutural do solo devido à baixa coesão entre partículas secas (Costa; Blanco, 2018). Portanto, sua associação à erosividade amplia capacidade interpretativa em diagnósticos ambientais.

## **2.5 Interpolação espacial aplicada à climatologia**

A interpolação espacial constitui etapa relevante em análises ambientais, pois viabiliza transformar valores pontuais em superfícies contínuas. Entre seus métodos mais aplicados destaca-se o Inverso da Distância Ponderada (IDW), caracterizado pela ponderação da influência de pontos amostrados sobre locais sem dados diretos (Ferreira Filho et al., 2019). O método é amplamente utilizado em estudos hidrometeorológicos, pois gera mapas interpretáveis de padrões climáticos.

Pesquisas recentes reforçam a eficiência da técnica para representar a variabilidade espacial das chuvas e identificar zonas críticas. Aplicações no território brasileiro apontam que mapas gerados por IDW favorecem o reconhecimento de áreas vulneráveis a inundações, secas e processos erosivos (Baratto; Albuquerque; Campos, 2025). Assim, a interpolação atua como ferramenta de suporte decisório em planejamento hídrico.

## **2.6 Projeções futuras de chuva e cenários climáticos**

A projeção climática constitui abordagem preventiva para antecipar impactos ambientais associados ao agravamento das mudanças globais. Modelos climáticos globais permitir realizar simulações que indicam mudanças plausíveis no comportamento de variáveis hidrológicas diante de cenários socioeconômicos distintos (IPCC, 2023).

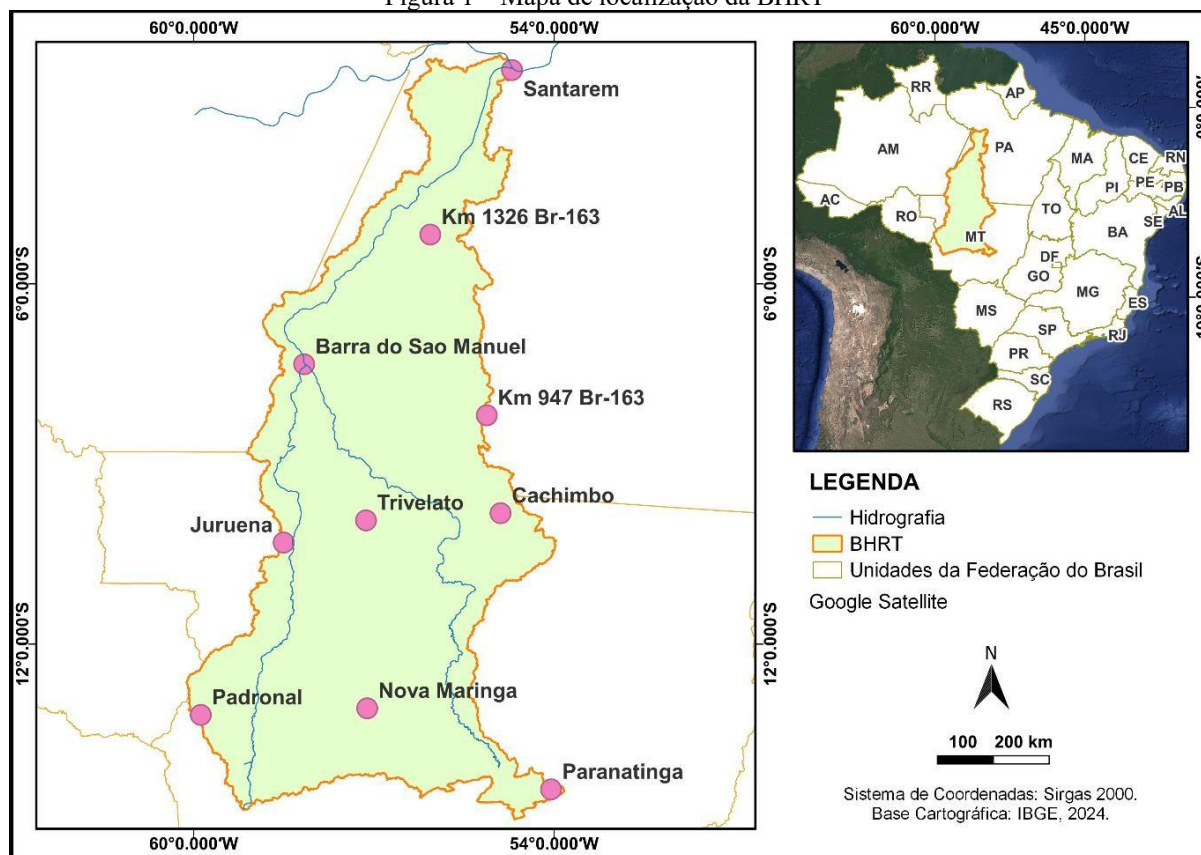
O uso dessas projeções tem permitido visualizar tendências de intensificação pluviométrica, sobretudo em regiões tropicais, onde mecanismos convectivos tendem a aumentar sob condições mais quentes (Aleman et al., 2017). Estudos recentes demonstram que tais cenários apontam redistribuições sazonais com reflexos diretos sobre erosividade e disponibilidade hídrica (Ferreira et al., 2024). Assim, analisar esses dados torna-se essencial para antecipar riscos futuros.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Caracterização da Área de Estudo

A área de estudo corresponde à Bacia Hidrográfica do Rio Tapajós (BHRT), ilustrada na Figura 1. Essa bacia possui uma área aproximada de 493.200 km<sup>2</sup>, distribuindo-se pelos estados do Pará, Mato Grosso e uma pequena porção do estado do Amazonas. Entre seus principais afluentes destacam-se os rios Juruena e Teles Pires, que contribuem significativamente para a formação do Rio Tapajós (Sousa; Santos; Costa, 2022).

Figura 1 – Mapa de localização da BHRT



Fonte: Autora, 2025.

O Rio Tapajós é o principal curso d'água da bacia, apresentando cerca de 1.900 km de extensão, e configura-se como o quinto maior afluente da bacia amazônica em área drenada, além de contribuir com aproximadamente 6% da descarga total de água doce lançada no Rio Amazonas. A região da BHRT apresenta elevada riqueza ambiental, abrangendo ampla biodiversidade e importantes recursos naturais, como florestas tropicais, grandes volumes de água e solos naturalmente férteis (The Nature Conservancy Brasil, 2019).

Do ponto de vista hidrológico, o rio apresenta um regime típico de clima equatorial úmido, marcado por períodos distintos de cheia e estiagem. Embora suas águas sejam reconhecidas pela boa qualidade e elevada transparência, o sistema hídrico do Tapajós vem sofrendo pressões crescentes decorrentes da intensificação de atividades antrópicas em seu entorno (ANA, 2020).

Através do site da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), por meio da plataforma HIDROWEB, foram obtidos os dados de precipitação 10 estações pluviométricas que possuíam mais anos sem falhas e estivessem distribuídas de forma que abrangesse toda a bacia (Tabela 1). As séries históricas analisadas abrangem o período de 1969 a 2024, apresentando duração variável entre as estações, com 31 a 46 anos de dados disponíveis. Após a obtenção, os dados foram transferidos para planilhas do Excel, onde foram organizados, analisados e utilizados para a realização dos cálculos necessários.

Tabela 1 – Estações pluviométricas

<b>Estação</b>	<b>Código</b>	<b>Período</b>
Santarém	254000	1969/2024
Km 1326 Br-163	555000	1981/2024
Barra do São Manuel	758000	1976/2024
Km 947 Br-163	855000	1978/2024
Cachimbo	954001	1985/2024
Trivelato	1057001	1983/2024
Juruena	1058003	1986/2024
Nova Maringá	1357000	1984/2024
Padronal	1359000	1984/2024
Paranatinga	1454000	1974/2024

Fonte: Autora, 2025.

### 3.2 Model for Interdisciplinary Research on Climate 5 (MIROC5)

Para realizar as projeções futuras de precipitação pluviométrica, foram utilizadas simulações de Modelos de Circulação Geral (GCM). Esses modelos são ferramentas matemáticas e computacionais que representam os principais processos físicos da atmosfera, dos oceanos e da superfície terrestre, permitindo simular o comportamento do clima em diferentes cenários de emissão de gases de efeito estufa. A escolha do modelo MIROC5 (Model for Interdisciplinary Research on Climate 5) deve-se ao seu bom desempenho na representação da precipitação climatológica, especialmente em regiões influenciadas pela Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), como a Amazônia (Costa; Blanco; Oliveira Júnior, 2021). Esse modelo apresenta avanços importantes na descrição de processos atmosféricos regionais e remotos, o que fortalece a base científica para a compreensão e enfrentamento dos impactos decorrentes das mudanças climáticas globais (Capistrano et al., 2018; Capistrano et al., 2020).

Considerando o período de 2025 a 2099, foram adotados os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 para as projeções futuras de precipitação. O RCP 4.5 é reconhecido como o cenário mais otimista, pois pressupõe a estabilização das emissões de gases de efeito estufa ao longo do século, resultando em impactos climáticos menos severos. Em contraste, o RCP 8.5 corresponde ao cenário mais pessimista, caracterizado pela manutenção de elevadas emissões e pela ausência de medidas eficazes de mitigação, o que intensifica a ocorrência de extremos climáticos. A escolha desses dois cenários fundamenta-se em três aspectos principais: representam futuros contrastantes (um moderado e outro crítico), são amplamente utilizados em pesquisas científicas internacionais, e o RCP 2.6 apresenta baixa probabilidade de concretização, devido à dificuldade em atingir metas rigorosas de redução das emissões globais (Costa; Blanco; Oliveira Júnior, 2020).

### **3.3 Erosividade da chuva**

O índice de erosividade originalmente indicado foi o EI30 que era determinado a partir do produto entre a energia cinética da chuva e a intensidade máxima ocorrida em 30 minutos, porém exigia grande quantidade de dados específicos, o que era um obstáculo (Rosa; Sousa, 2018). A partir de então, outros trabalhos facilitaram o cálculo desta variável. A metodologia mais utilizada é a proposta por Silva (2004), que propôs que o Brasil fosse dividido em oito regiões homogêneas em termos de precipitação (Figura 2), sendo que cada região possuiria uma equação específica de acordo com as suas condições regionais.

Figura 2 - Mapa de determinação do fator energético da chuva



Fonte: Silva, 2004.

Para a região da BHRT, as equações propostas por Oliveira Júnior e Medina (1990) e por Morais et al. (1991) são indicadas para a estimativa da erosividade das chuvas (Quadro 1). No entanto, a aplicação da equação de Oliveira Júnior e Medina (1990) nas estações analisadas não apresentou resultados satisfatórios, uma vez que os valores estimados de erosividade mostraram-se incompatíveis com o regime pluviométrico da região, caracterizado por elevados volumes de precipitação. Diante disso, optou-se pela substituição pela equação proposta por Morais et al. (1991), que apresentou valores mais coerentes com a variabilidade pluviométrica observada e com o comportamento esperado do potencial erosivo das chuvas.

Essa constatação é confirmada pelo estudo de Martins, Blanco e Melo (2020), que destacam a ocorrência de menores valores de erosividade em áreas onde o fator R foi estimado a partir das equações de Oliveira Júnior e Medina (1990). Segundo esses autores, tais equações tendem a subestimar a erosividade nas regiões Norte e Oeste do Pará, pois, mesmo em áreas com elevados índices pluviométricos, os valores calculados são inferiores ou semelhantes àqueles obtidos em regiões com menor precipitação anual. Assim, a adoção da equação de Morais et al. (1991) mostrou-se mais adequada para a BHRT, reforçando a necessidade de ajustes regionais ou do desenvolvimento de novas equações que representem de forma mais fiel a dinâmica climática e o potencial erosivo das chuvas nessa região.

Quadro 1 – Equações de Erosividade da Chuva

Número	Autor	Equação
1	Oliveira e Medina, 1990	$Ei_{30} = 42,77 + 3,76.MFI$
2	Morais et al., 1991	$Ei_{30} = 36,894.MFI^{1,0852}$

Fonte: Silva, 2004.

Para avaliar como a erosividade varia ao longo do ano, foi calculada a média mensal utilizando os dados das estações para todos os anos sem falhas na série histórica. Para os cenários futuros, o mesmo procedimento foi adotado, considerando os valores mensais de EI30 no período de 2025 a 2099. Assim, por exemplo, a média de janeiro corresponde aos valores de erosividade registrados em todos os meses de janeiro da série analisada, e o mesmo foi feito para os demais meses. Esse processo permitiu identificar quais períodos do ano apresentam maior ou menor erosividade. A classificação dos valores obtidos seguiu os critérios definidos por Batjes (1996), que são considerados mais adequados para regiões com alta erosividade, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Classificação da Erosividade da Chuva

Erosividade (MJ mm ha <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> mês <sup>-1</sup> )	Erosividade (MJ mm ha <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup> )	Classe de Erosividade
$R \geq 1.250$	$R \geq 15.000$	Alta
$800 < R < 1.250$	$9.600 < R < 15.000$	Média
$R \leq 800$	$R \leq 9.600$	Baixa

Fonte: Batjes, 1996.

### 3.4 Índice de anomalia da chuva (IAC)

Para o cálculo do IAC, desenvolvido por Rooy (1965), foram empregadas a Equação 1 para as anomalias positivas e a Equação 2 para as anomalias negativas. Trata-se de uma ferramenta amplamente utilizada em análises pluviométricas, devido à sua simplicidade de cálculo e eficiência na interpretação da variabilidade das chuvas.

$$IAC = 3 * \left( \frac{N-N1}{M-N1} \right) \quad (1)$$

$$IAC = -3 * \left( \frac{N-N1}{X-N1} \right) \quad (2)$$

Em que N é a precipitação anual observada (mm); N1 é a precipitação média anual da série histórica (mm); M é a média das dez maiores precipitações anuais da série histórica (mm); X é a média das dez menores precipitações anuais da série histórica (mm). As anomalias positivas são valores acima da média e as negativas, abaixo da média, podendo-se avaliar sua classificação conforme a Tabela 3.

Tabela 3 - Classificação do índice de anomalia da chuva (IAC)

<b>Faixa do IAC</b>	<b>Classificação de intensidade</b>
> 4	Extremamente úmido
2 a 4	Muito úmido
0 a 2	Úmido
0 a -2	Seco
-2 a -4	Muito seco
< -4	Extremamente seco

Fonte: Adaptado de Araújo et al. (2009).

### **3.5 Inverse Distance Weighting (IDW)**

O uso de métodos de análise espacial tem se expandido em estudos realizados na Amazônia, principalmente devido à baixa densidade de estações pluviométricas na região. Pesquisas mostram que o método IDW é eficaz para preencher lacunas de dados, permitindo uma representação mais distribuída dos fenômenos hidrológicos em grandes áreas de drenagem (Ferreira Filho et al., 2019). Assim, a interpolação espacial contribui para aprimorar o diagnóstico ambiental em áreas de grande relevância, como a BHRT.

Para esse estudo foram calculadas as médias anuais de erosividade de todos os anos da série histórica de cada estação com o objetivo de visualizar a distribuição espacial da erosividade da chuva do presente nas 10 estações da BHRT.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

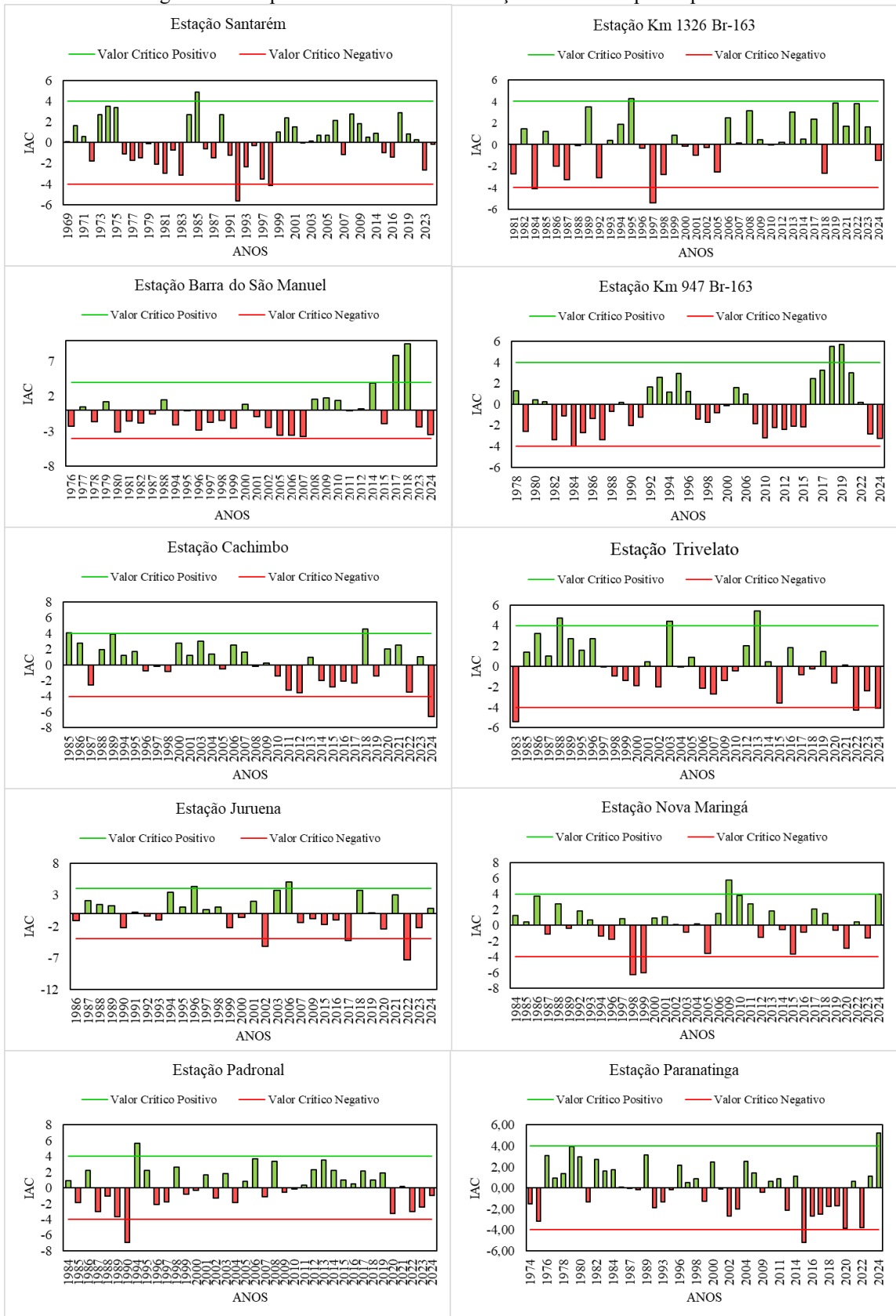
### 4.1 IAC

#### 4.1.1 Presente

A análise do IAC evidenciou a ocorrência de eventos hidrológicos extremos ao longo das séries históricas das estações avaliadas (Figura 3), permitindo identificar anos de maior relevância climática e compreender a variabilidade pluviométrica regional. Na estação de Santarém, o ano de 1985 destacou-se como extremamente chuvoso (IAC = 4,88), enquanto 1992 e 1998 configuraram-se como eventos extremamente secos, com IAC de -5,66 e -4,13, respectivamente. Esses anos coincidem com períodos de forte influência do fenômeno El Niño, que, segundo Ferreira et al. (2022), esteve associado a anomalias significativas no regime pluvial amazônico.

Na estação Km 1326 da BR-163, o principal evento extremamente úmido ocorreu em 1995 (IAC = 4,24), ao passo que 1984 e 1997 foram caracterizados como extremamente secos, com valores de -4,07 e -5,38. Na estação Barra do São Manuel, registraram-se apenas eventos extremos úmidos, nos anos de 2017 e 2018, com IAC de 7,84 e 9,48, respectivamente, indicando episódios de precipitação excepcionalmente elevada. Em contrapartida, não foram identificados eventos extremamente secos nessa série, o que sugere um comportamento distinto em relação às demais estações.

Figura 3 - Comportamento do IAC nas estações analisadas para o presente



Fonte: Autora, 2025.

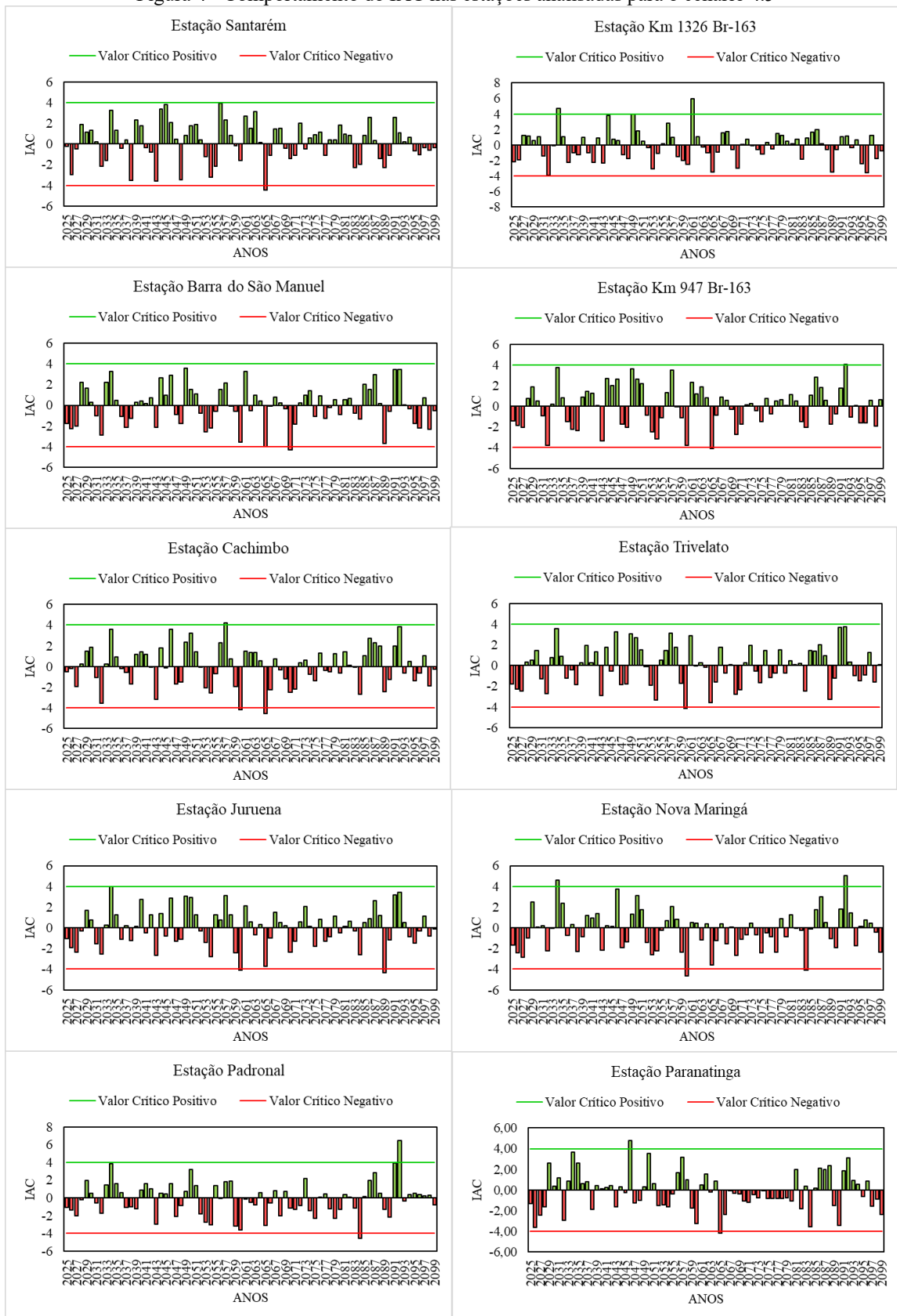
Na estação Km 947 da BR-163, os anos de 2018 e 2019 apresentaram condições extremamente úmidas, com IAC de 5,51 e 5,73, respectivamente, enquanto 1984 foi classificado como extremamente seco, com IAC de  $-4,02$ , evidenciando a alternância entre extremos ao longo das décadas. A estação Cachimbo registrou eventos extremamente úmidos em 1985 e 2018, com IAC de 4,06 e 4,58, além de um evento extremamente seco em 2024, com IAC de  $-6,59$ . Em Trivelato, os extremos úmidos ocorreram em 1988, 2003 e 2013, enquanto os extremos secos foram observados em 1983, 2022 e 2024, reforçando a elevada variabilidade climática associada a eventos de grande escala, como o El Niño de 1982–1983, conforme destacado por Nery e Siqueira (2020).

Na estação Juruena, os anos de 1996 e 2006 foram classificados como extremamente úmidos, enquanto 2002, 2017 e 2022 apresentaram condições extremamente secas, com destaque para 2022, que registrou IAC de  $-7,28$ . Em Nova Maringá, 2009 apresentou condição extremamente úmida, com IAC de 5,77, enquanto 1998 e 1999 foram extremamente secos, com valores inferiores a  $-6,00$ . Na estação Padronal, o evento extremamente chuvoso ocorreu em 1994, com IAC de 5,63, enquanto 1990 destacou-se como extremamente seco, com IAC de  $-6,91$ . Em Paranatinga, 2024 foi classificado como extremamente chuvoso, com IAC de 5,25, enquanto 2015 representou o principal evento extremamente seco, em consonância com Lulu et al. (2022), que identificaram 2015 como o ano mais crítico no Mato Grosso entre 1988 e 2022, associado a um El Niño de baixa intensidade, conforme Ferreira et al. (2022).

#### 4.1.2 Cenário RCP 4.5

No cenário futuro RCP 4.5, a análise do IAC indica a persistência de eventos hidrológicos extremos ao longo do período projetado, evidenciando alterações no regime pluviométrico das estações avaliadas. Em Santarém, não foram identificados eventos extremamente úmidos, destacando-se 2065 como extremamente seco, com IAC de  $-4,48$ , sugerindo maior recorrência de déficits hídricos. Na estação Km 1326 da BR-163, projetam-se eventos extremamente úmidos em 2034, 2049 e 2061, com IAC entre 4,00 e 5,95, sem ocorrência de extremos secos, indicando intensificação das chuvas. Em Barra do São Manuel, o principal extremo projetado corresponde à seca em 2070, com IAC de  $-4,30$ . Já na estação Km 947 da BR-163, observa-se maior variabilidade, com um evento extremamente úmido em 2092 e outro extremamente seco em 2065, evidenciando a alternância de extremos, em consonância com projeções de intensificação de secas e cheias na Amazônia.

Figura 4 - Comportamento do IAC nas estações analisadas para o cenário 4.5



Fonte: Autora, 2025.

Em Cachimbo, o ano de 2057 destacou-se como extremamente úmido, com IAC de 4,19, enquanto 2060 e 2065 foram classificados como extremamente secos, com valores de -4,16 e -4,53, respectivamente, indicando intensificação de eventos de seca. Para a estação Trivelato, não foram projetados eventos extremamente úmidos, sendo identificado apenas o extremo seco em 2060, com IAC de -4,14. De forma semelhante, na estação Juruena, os extremos projetados concentraram-se em eventos secos, nos anos de 2060 (IAC = -4,10) e 2089 (IAC = -4,36).

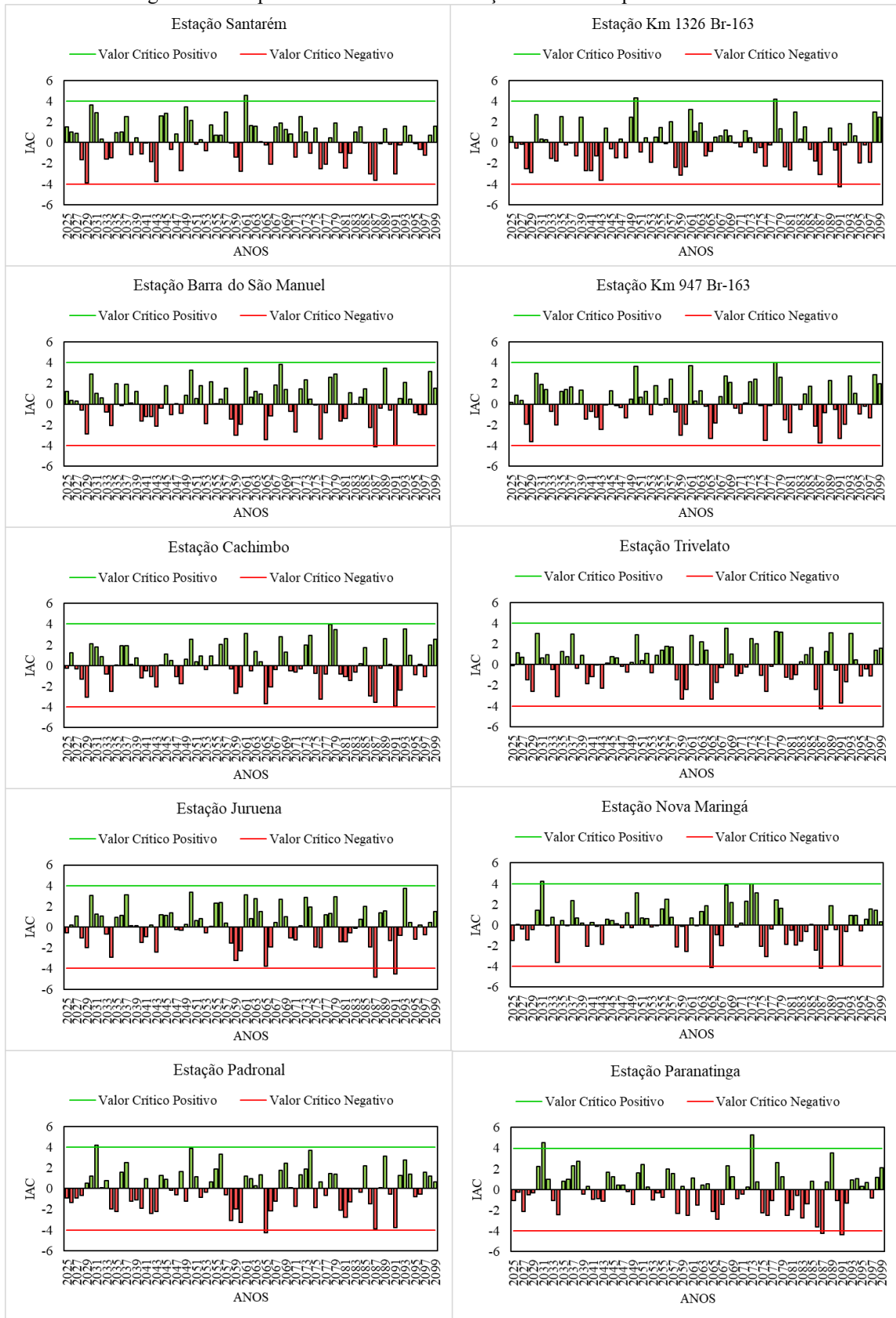
Na estação Nova Maringá, observaram-se extremos em ambos os sinais, com eventos extremamente úmidos em 2034 (IAC = 4,59) e 2092 (IAC = 5,04), e extremos secos em 2060 (IAC = -4,66) e 2084 (IAC = -4,12), indicando elevada variabilidade climática futura. Para a estação Padronal, destacou-se o evento extremamente úmido de 2092, com IAC de 6,49, contrastando com o extremo seco projetado para 2084, com IAC de -4,54. E por fim, na estação Paranatinga, o ano de 2046 apresentou condição extremamente úmida, com IAC de 4,79, enquanto 2065 foi classificado como extremamente seco, com valor de -4,19.

#### 4.1.3 Cenário RCP 8.5

Para o cenário futuro pessimista RCP 8.5 apresentado na Figura 5, o IAC indica intensificação e maior recorrência de eventos hidrológicos extremos em comparação ao cenário RCP 4.5, sobretudo associados a condições de seca severa. Na estação Santarém, foi identificado apenas um evento extremamente úmido (IAC = 4,58), sem ocorrência de extremos secos, contrastando com o cenário 4.5, no qual predominavam eventos secos extremos. Já na estação Km 1326 da BR-163, projetaram-se extremos em ambos os sinais, com anos extremamente úmidos em 2050 (IAC = 4,30) e 2078 (IAC = 4,16), além de um evento extremamente seco em 2091 (IAC = -4,27), evidenciando aumento da variabilidade climática sob forçamento mais intenso.

Para a estação Barra do São Manuel, não foram projetados eventos extremamente úmidos, enquanto os extremos secos ocorreram em 2087 (IAC = -4,14) e 2091 (IAC = -4,03), indicando agravamento das condições de estiagem quando comparado ao RCP 4.5, no qual apenas um extremo seco foi identificado. Na estação Km 947 da BR-163, destacou-se o ano de 2078 como extremamente úmido (IAC = 4,04), sem registros de extremos secos, diferindo do cenário 4.5, que apresentou alternância entre extremos positivos e negativos. Em Cachimbo, não foram identificados eventos extremos, sugerindo relativa estabilidade frente aos demais pontos analisados, mesmo sob o cenário pessimista.

Figura 5 - Comportamento do IAC nas estações analisadas para o cenário 8.5



Fonte: Autora, 2025.

Na estação Trivelato, o ano de 2087 foi classificado como extremamente seco, com IAC de  $-4,27$ , reforçando a tendência de intensificação das secas observada também no cenário 4.5. Em Juruena, os extremos concentraram-se exclusivamente em condições secas, com destaque para 2087 (IAC =  $-4,87$ ) e 2091 (IAC =  $-4,55$ ), valores mais severos que aqueles projetados no cenário intermediário, indicando maior vulnerabilidade hidrológica futura. Em Nova Maringá, observou-se um evento extremamente úmido em 2031 (IAC =  $4,22$ ) e extremos secos em 2065 (IAC =  $-4,09$ ) e 2087 (IAC =  $-4,18$ ), evidenciando forte oscilação entre excesso e déficit hídrico.

Na estação Padronal, o extremo úmido ocorreu em 2031 (IAC =  $4,17$ ), enquanto o evento extremamente seco foi projetado para 2065 (IAC =  $-4,26$ ), comportamento semelhante ao observado em Nova Maringá, porém com valores mais intensos que no RCP 4.5. Por fim, em Paranatinga, destacaram-se dois eventos extremamente úmidos, em 2031 (IAC =  $4,56$ ) e 2073 (IAC =  $5,29$ ), contrastando com extremos secos em 2087 (IAC =  $-4,23$ ) e 2091 (IAC =  $-4,34$ ).

Esses resultados reforçam a elevada variabilidade climática futura e a alternância entre extremos úmidos e secos, o que pode intensificar tanto os riscos de enchentes quanto os de secas severas na região. Segundo Farinosi et al. (2019), o futuro da floresta amazônica dependerá não apenas de decisões locais relacionadas ao uso da terra e ao desenvolvimento regional, mas também de medidas globais voltadas à mitigação das mudanças climáticas. Os autores destacam que há elevado nível de incerteza quanto aos impactos futuros, já que os efeitos diretos das alterações climáticas e do uso da terra sobre os ecossistemas tropicais ainda não são plenamente compreendidos.

Além disso, a resposta líquida da floresta está condicionada a complexos mecanismos de retroalimentação entre a biosfera e a atmosfera, que influenciam diretamente o clima da região. Nesse sentido, os resultados projetados para o IAC evidenciam a necessidade de considerar tais incertezas e retroalimentações ao avaliar os impactos futuros sobre os recursos hídricos e a resiliência dos ecossistemas amazônicos. De forma geral, o cenário RCP 8.5 aponta para maior severidade e frequência de extremos hidrológicos, sobretudo secos, em relação ao cenário 4.5, sugerindo impactos mais expressivos sobre a disponibilidade hídrica e os sistemas ambientais regionais ao longo do século.

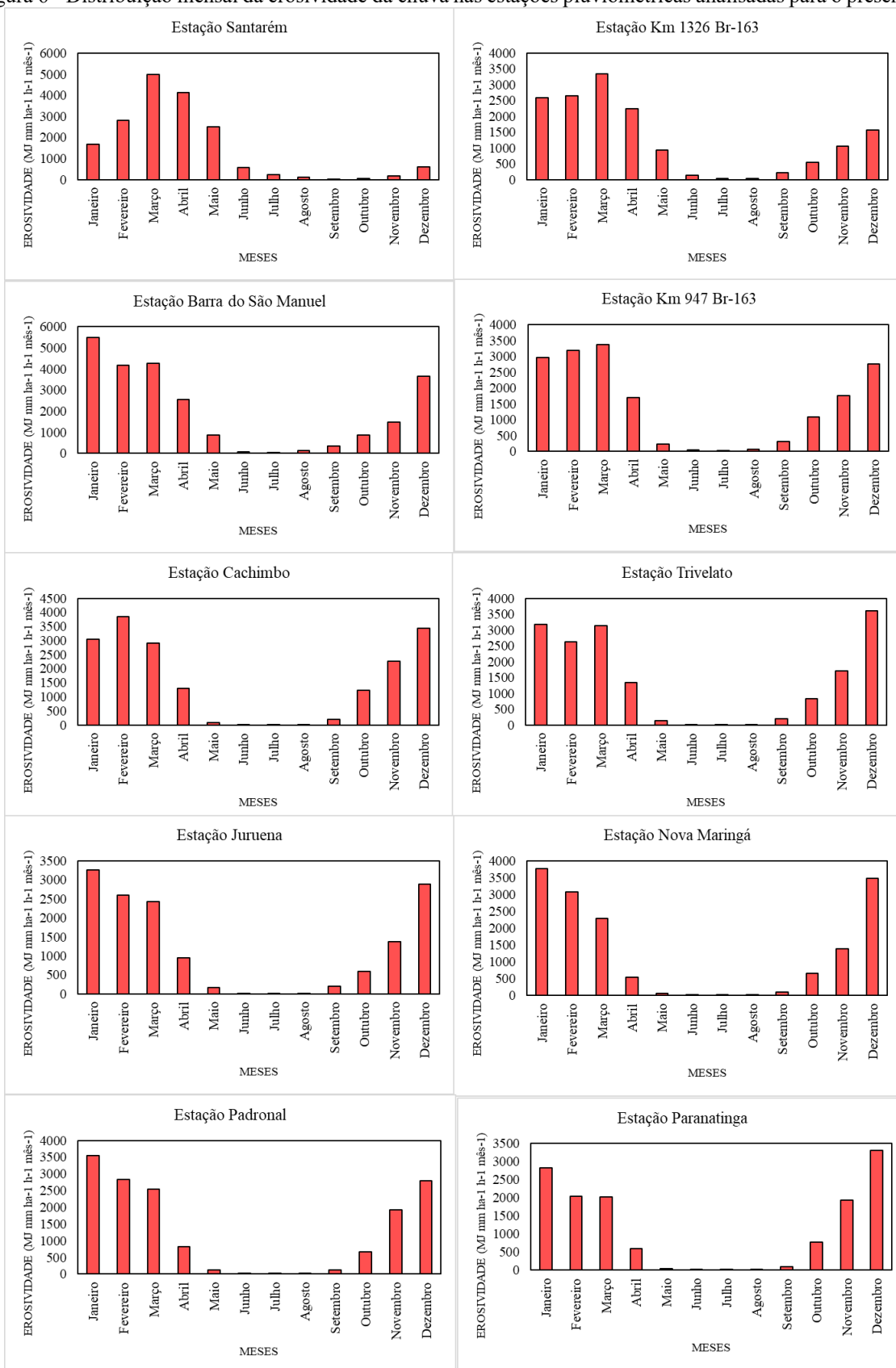
## 4.2 Erosividade da Chuva

### 4.2.1 Presente

A análise da erosividade mensal no período presente (Figura 6) evidencia um padrão sazonal bem definido em todas as estações avaliadas. No estado do Pará, a estação de Santarém apresentou um dos maiores valores de erosividade entre janeiro e maio, com pico em março, quando foi registrado o valor de 4980,31 MJ mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> mês<sup>-1</sup>. Comportamento semelhante foi observado nas estações Km 1326 e Km 947 da BR-163, ambas com máximos também em março, atingindo 3347,45 e 3373,95 MJ mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> mês<sup>-1</sup>, respectivamente. Esse padrão está diretamente associado à sazonalidade da precipitação na Amazônia Oriental, caracterizada por um período chuvoso bem definido entre dezembro e maio, com intensificação das chuvas nos meses de fevereiro, março e abril, em função da atuação da Zona de Convergência Intertropical e da convecção local (Oliveira et al., 2025). Em todas essas estações, observa-se redução acentuada da erosividade a partir de maio, mantendo-se valores baixos até o final do período seco.

Na estação Barra do São Manuel, no Amazonas, os valores elevados de erosividade concentraram-se entre novembro e abril, com pico em março, atingindo 5497,85 MJ mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> mês<sup>-1</sup>, o maior valor registrado entre todas as estações analisadas no estudo, enquanto os menores valores ocorreram entre junho e setembro. Esse comportamento reforça a forte associação entre erosividade e o regime pluviométrico regional, típico da Amazônia central, onde predomina um longo período chuvoso seguido por uma estiagem relativamente curta. Segundo Silva Neto et al. (2025), essa característica torna a região Norte do Brasil singular do ponto de vista climático, uma vez que apresenta elevada duração do período chuvoso e volumes expressivos de precipitação, fatores que favorecem altos índices de erosividade das chuvas.

Figura 6 - Distribuição mensal da erosividade da chuva nas estações pluviométricas analisadas para o presente



Fonte: Autora, 2025.

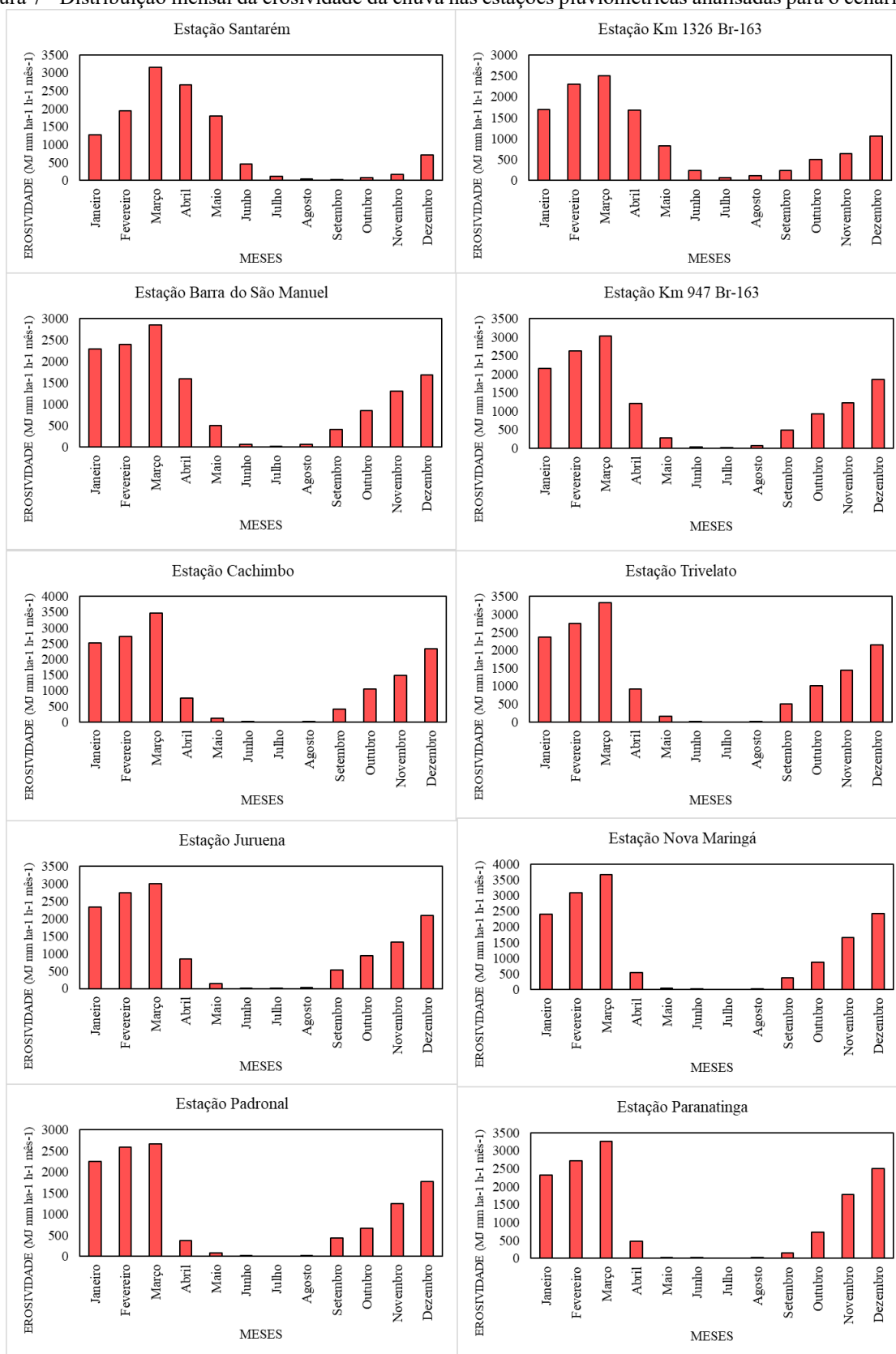
No estado do Mato Grosso, embora o padrão sazonal da erosividade seja semelhante ao observado nas regiões amazônicas, com máximos no período chuvoso e mínimos no período seco, verificam-se variações no mês de maior potencial erosivo entre as estações. Em Cachimbo, o pico ocorreu em fevereiro ( $3848,13 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ mês}^{-1}$ ), enquanto em Trivelato e Paranatinga os maiores valores foram registrados em dezembro, com  $3607,49$  e  $3314,95 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ mês}^{-1}$ , respectivamente. Já nas estações Juruena, Nova Maringá e Padronal, o mês de janeiro concentrou os maiores potenciais erosivos, com valores de  $3266,91$ ,  $3767,54$  e  $3548,71 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ mês}^{-1}$ , refletindo a influência do avanço das chuvas de verão sobre o centro-norte do estado.

Os resultados indicam que a erosividade das chuvas segue a sazonalidade da precipitação, com maior risco de processos erosivos no auge da estação chuvosa e redução durante a estiagem. As diferenças observadas nos picos e nos meses de máxima erosividade refletem particularidades climáticas locais e regionais. Em comparação com outras regiões do Brasil, a área de estudo apresenta índices mais elevados, especialmente no Norte, devido à maior concentração e intensidade das chuvas. Estudos como o de Óbidos (PA) demonstram forte relação entre a distribuição da precipitação e o potencial erosivo, mostrando que áreas amazônicas tendem a apresentar índices superiores à média nacional (Rosa; Sousa, 2018).

#### 4.2.2 Cenário RCP 4.5

Para o cenário mais otimista apresentado na Figura 7 podemos observar que a estação de Santarém mantém comportamento semelhante ao período presente, com pico de erosividade em março, atingindo  $3161,20 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ mês}^{-1}$ , seguido por redução acentuada a partir de junho, sendo o setembro o mês com menor valor de erosividade. Padrão próximo é projetado para as estações Km 1326 e Km 947 da BR-163, ambas com máximos também em março, registrando valores de  $2505,55$  e  $3027,85 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ mês}^{-1}$ , respectivamente. Na estação Barra do São Manuel, no Amazonas, o pico igualmente ocorre em março, com erosividade projetada de  $2852,14 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ mês}^{-1}$ , evidenciando coerência regional entre as áreas amazônicas. Resultados semelhantes foram observados por Oliveira et al. (2025): Em Belém do Pará os maiores índices médios mensais de erosividade da chuva ocorreram nos meses de março e abril, enquanto os menores valores foram registrados em setembro e agosto, evidenciando a forte influência da sazonalidade sobre o potencial erosivo das precipitações na região.

Figura 7 - Distribuição mensal da erosividade da chuva nas estações pluviométricas analisadas para o cenário 4.5



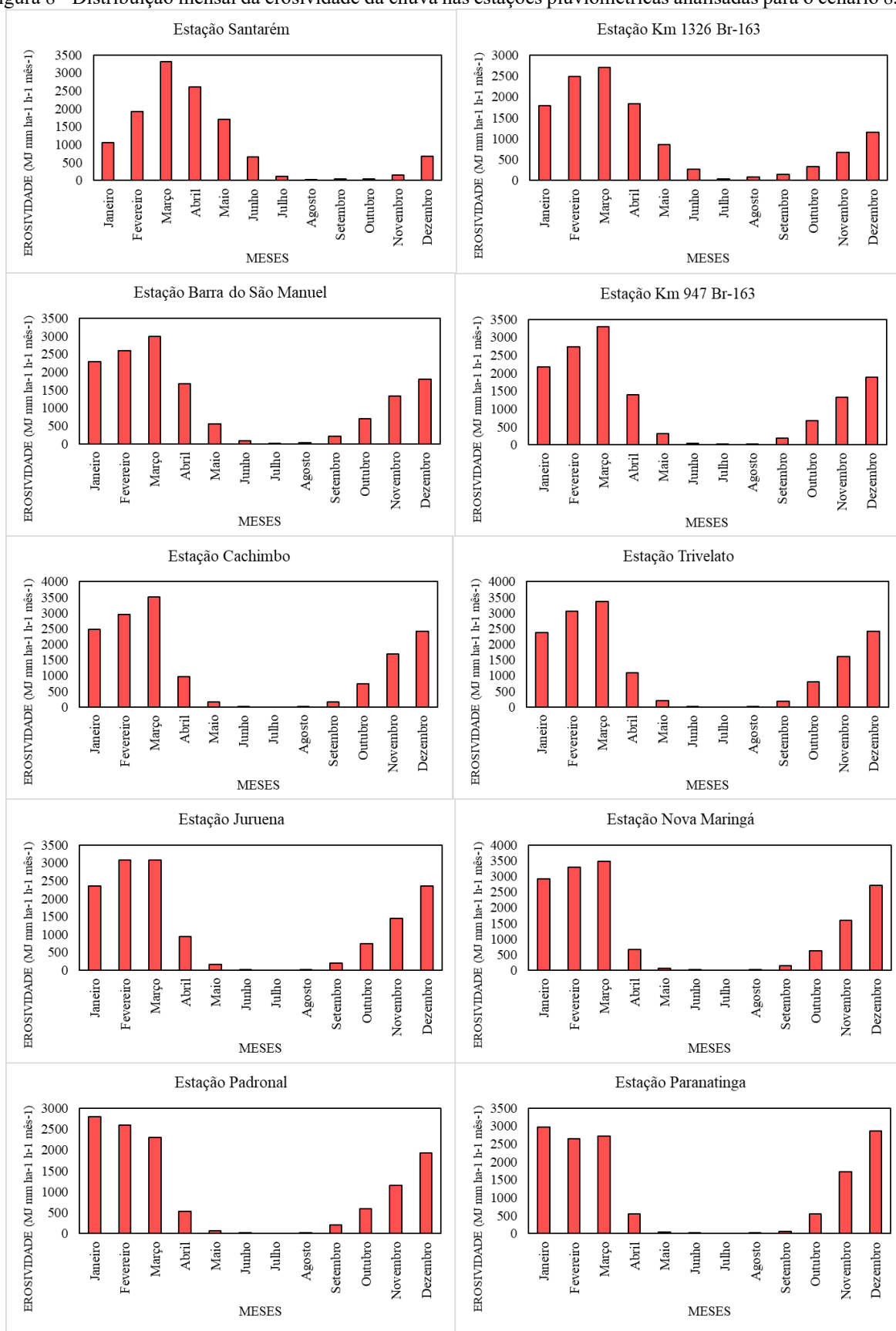
Fonte: Autora, 2025.

No Mato Grosso, as estações apresentam comportamento homogêneo, com concentração dos maiores valores de erosividade entre novembro e março. Em Cachimbo e Trivelato, os picos projetados ocorrem em março, com valores de 3471,01 e 3317,68 MJ mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> mês<sup>-1</sup>, respectivamente. Situação semelhante é observada em Juruena, Nova Maringá e Padronal, onde março concentra os maiores potenciais erosivos, alcançando 2998,20, 3667,65 e 2657,78 MJ mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> mês<sup>-1</sup>. Em Paranatinga, o pico também é projetado para março, com valor de 3253,91 MJ mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> mês<sup>-1</sup>. De forma geral, os maiores valores projetados ocorrem entre novembro e março, enquanto julho permanece como o mês de menor potencial erosivo em todas as estações, sugerindo continuidade do controle sazonal exercido pelo regime pluviométrico regional.

#### 4.2.3 Cenário RCP 8.5

No cenário mais extremo e considerado mais realista (Figura 8), pode observa-se que na estação de Santarém apresentou pico de erosividade em março, atingindo 3312,25 MJ mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> mês<sup>-1</sup>, valor superior ao projetado no cenário RCP 4.5, indicando intensificação do potencial erosivo. Comportamento semelhante foi projetado para as estações Km 1326 e Km 947 da BR-163, ambas com máximos também em março, registrando valores de 2704,34 e 3301,98 MJ mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> mês<sup>-1</sup>, respectivamente. Na estação Barra do São Manuel, no Amazonas, o pico igualmente ocorre em março, com valor de 3004,18 MJ mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> mês<sup>-1</sup>, mantendo coerência regional, porém com magnitudes mais elevadas que no cenário otimista.

Figura 8 - Distribuição mensal da erosividade da chuva nas estações pluviométricas analisadas para o cenário 8.5



Fonte: Autora, 2025.

No estado do Mato Grosso, as estações apresentaram comportamento homogêneo e tendência clara de intensificação da erosividade em relação ao RCP 4.5. Em Cachimbo e Trivelato, os maiores valores projetados concentram-se em março, com 3513,29 e 3370,50 MJ mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> mês<sup>-1</sup>, respectivamente. Nas estações Juruena e Nova Maringá, março também concentra os picos de erosividade, atingindo 3080,15 e 3477,71 MJ mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> mês<sup>-1</sup>. Já em Padronal e Paranatinga, os maiores valores ocorrem em janeiro, que registrou 2800,16 MJ mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> mês<sup>-1</sup> em Padronal e 2970,34 MJ mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> mês<sup>-1</sup> em Paranatinga.

De forma integrada, os resultados do cenário RCP 8.5 sugerem agravamento do potencial erosivo das chuvas quando comparado ao cenário RCP 4.5, especialmente nos meses de maior concentração pluviométrica. Embora o padrão sazonal permaneça semelhante, a elevação dos valores máximos indica maior risco de processos erosivos no futuro pessimista, com possíveis impactos mais severos sobre a dinâmica do solo e dos sistemas ambientais nas áreas analisadas.

### **4.3 Relação entre IAC e Erosividade**

Podemos observar no Quadro 2 que na estação Santarém, os anos extremamente secos de 1992 e 1998 apresentaram predomínio de meses com baixa erosividade, enquanto o ano extremamente úmido de 1985 mostrou aumento da frequência de meses com erosividade alta. Padrão semelhante foi observado na estação Km 1326 da BR-163, onde o ano extremamente úmido de 1995 concentrou maior número de meses altamente erosivos, em contraste com o ano extremamente seco de 1997. Esses resultados estão de acordo com estudos desenvolvidos na região Norte do Brasil, onde maiores volumes anuais de precipitação estão associados a maiores valores de erosividade (Rosa; Sousa, 2018; Martins; Blanco; Melo, 2020).

Em Barra do São Manuel, os anos extremamente úmidos de 2017 e 2018 apresentaram elevada concentração de meses com alta erosividade, destacando-se 2018. Na estação Km 947 da BR-163, os anos extremamente úmidos de 2018 e 2019 contrastaram fortemente com o ano extremamente seco de 1984, que apresentou predominância de meses pouco erosivos. Esse comportamento é coerente com a concentração da erosividade anual nos meses de fevereiro, março e abril, período que pode representar mais de 60% do total anual, coincidindo com os meses de maior precipitação (Rosa; Sousa, 2018).

Quadro 2 - Relação do IAC e Erosividade para o presente

(continua)

<b>Santarém</b>			Erosividade		
Anos Extremos	IAC	Classificação	Baixa	Média	Alta
1998	-4,13	Extremamente seco	8 meses	1 mês	3 meses
1992	-5,66	Extremamente seco	9 meses	1 mês	2 meses
1985	4,88	Extremamente úmido	6 meses	-	6 meses
<b>Km 1326 Br-163</b>			Erosividade		
Anos Extremos	IAC	Classificação	Baixa	Média	Alta
1995	4,24	Extremamente úmido	5 meses	-	7 meses
1997	-5,38	Extremamente seco	9 meses	-	3 meses
<b>Barra do São Manuel</b>			Erosividade		
Anos Extremos	IAC	Classificação	Baixa	Média	Alta
2017	7,84	Extremamente úmido	5 meses	1 mês	6 meses
2018	9,48	Extremamente úmido	3 meses	2 meses	7 meses
<b>Km 947 Br-163</b>			Erosividade		
Anos Extremos	IAC	Classificação	Baixa	Média	Alta
1984	-4,02	Extremamente seco	8 meses	-	4 meses
2018	5,51	Extremamente úmido	4 meses	1 mês	7 meses
2019	5,73	Extremamente úmido	5 meses	-	7 meses
<b>Cachimbo</b>			Erosividade		
Anos Extremos	IAC	Classificação	Baixa	Média	Alta
1985	4,06	Extremamente úmido	5 meses	-	7 meses
2018	4,58	Extremamente úmido	6 meses	-	6 meses
2024	-6,59	Extremamente seco	6 meses	2 meses	4 meses
<b>Trivelato</b>			Erosividade		
Anos Extremos	IAC	Classificação	Baixa	Média	Alta
1983	-5,42	Extremamente seco	8 meses	1 mês	3 meses
1988	4,75	Extremamente úmido	6 meses	1 mês	5 meses
2003	4,40	Extremamente úmido	6 meses	1 mês	5 meses
2013	5,43	Extremamente úmido	6 meses	-	6 meses
2022	-4,26	Extremamente seco	6 meses	2 meses	4 meses
2024	-4,09	Extremamente seco	7 meses	-	5 meses

Quadro 3 - Relação do IAC e Erosividade para o presente

(conclusão)

<b>Juruena</b>			<b>Erosividade</b>		
Anos Extremos	IAC	Classificação	Baixa	Média	Alta
1996	4,34	Extremamente úmido	6 meses	1 mês	5 meses
2002	-5,17	Extremamente seco	7 meses	2 meses	3 meses
2006	5,10	Extremamente úmido	5 meses	1 mês	6 meses
2017	-4,25	Extremamente seco	8 meses	1 mês	3 meses
2022	-7,28	Extremamente seco	10 meses	-	2 meses
<b>Nova Maringá</b>			<b>Erosividade</b>		
Anos Extremos	IAC	Classificação	Baixa	Média	Alta
1998	-6,26	Extremamente seco	10 meses	-	2 meses
1999	-6,04	Extremamente seco	9 meses	1 mês	2 meses
2009	5,77	Extremamente úmido	7 meses	1 mês	4 meses
<b>Padronal</b>			<b>Erosividade</b>		
Anos Extremos	IAC	Classificação	Baixa	Média	Alta
1990	-6,91	Extremamente seco	8 meses	1 mês	3 meses
1994	5,63	Extremamente úmido	8 meses	-	4 meses
<b>Paranatinga</b>			<b>Erosividade</b>		
Anos Extremos	IAC	Classificação	Baixa	Média	Alta
2015	-5,18	Extremamente seco	9 meses	-	3 meses
2024	5,25	Extremamente úmido	5 meses	-	7 meses

Fonte: Autora, 2025.

Nas estações do Mato Grosso, a relação manteve-se consistente. Em Trivelato, os anos extremamente úmidos (1988, 2003 e 2013) apresentaram maior número de meses com erosividade elevada, enquanto os anos extremamente secos (1983, 2022 e 2024) concentraram meses pouco erosivos. Em Juruena, o ano extremamente seco de 2022 destacou-se pela predominância de meses com baixa erosividade, em contraste com os anos extremamente úmidos de 1996 e 2006. Esse comportamento está associado ao regime climático do estado, com estação chuvosa bem definida entre outubro e abril e estiagem entre maio e setembro, sendo julho o mês com menores volumes de precipitação e, conseqüentemente, menor erosividade (Vieira et al., 2024).

Em Nova Maringá e Padronal, os anos extremamente secos (1998, 1999 e 1990) apresentaram baixos potenciais erosivos mensais, enquanto os anos extremamente úmidos (2009 e 1994) registraram aumento da erosividade. Em Paranatinga, o ano extremamente seco de 2015 contrastou com o ano extremamente úmido de 2024, que concentrou maior número de meses erosivos, reforçando a relação direta entre anomalias positivas de precipitação e intensificação dos processos erosivos, aspecto relevante para o manejo do solo e dos recursos hídricos na região (Silva Neto et al., 2025).

No cenário futuro RCP 4.5, a relação entre IAC e Erosividade (Quadro 3) mantém coerência com o período presente, indicando que anomalias positivas de precipitação continuam associadas ao aumento do número de meses erosivos, embora o potencial permaneça concentrado no período chuvoso. Em Santarém, o ano extremamente seco de 2065 apresentou predominância de meses com baixa erosividade. Na estação Km 1326 da BR-163, os anos extremamente úmidos de 2034, 2049 e 2061 apresentaram maior frequência de meses com erosividade média e alta, padrão compatível com a intensificação das chuvas projetadas para o período chuvoso.

Em Barra do São Manuel, o ano extremamente seco de 2070 apresentou comportamento semelhante ao observado em Santarém, com predomínio de meses pouco erosivos. Na estação Km 947 da BR-163, o contraste entre o ano extremamente seco de 2065 e o ano extremamente úmido de 2092 evidenciou resposta sensível da erosividade às anomalias de chuva. Em Cachimbo, o ano extremamente úmido de 2057 apresentou maior número de meses erosivos, enquanto os anos extremamente secos de 2060 e 2065 concentraram meses de baixa erosividade, comportamento compatível com o regime climático sazonal do Mato Grosso (Vieira et al., 2024).

Quadro 4 - Relação IAC e Erosividade para o futuro no cenário 4.5

(continua)

<b>Santarém</b>			<b>Erosividade</b>		
Anos Extremos	IAC	Classificação	Baixa	Média	Alta
2065	-4,48	Extremamente seco	9 meses	-	3 meses
<b>Km 1326 Br-163</b>			<b>Erosividade</b>		
Anos Extremos	IAC	Classificação	Baixa	Média	Alta
2034	4,72	Extremamente úmido	5 meses	3 meses	4 meses
2049	4,00	Extremamente úmido	6 meses	2 meses	4 meses
2061	5,95	Extremamente úmido	5 meses	3 meses	4 meses

Quadro 5 - Relação IAC e Erosividade para o futuro no cenário 4.5

(conclusão)

<b>Barra do São Manuel</b>			Erosividade		
Anos Extremos	IAC	Classificação	Baixa	Média	Alta
2070	-4,30	Extremamente seco	9 meses	-	3 meses
<b>Km 947 Br-163</b>			Erosividade		
Anos Extremos	IAC	Classificação	Baixa	Média	Alta
2065	-4,12	Extremamente seco	9 meses	-	3 meses
2092	4,02	Extremamente úmido	4 meses	1 mês	7 meses
<b>Cachimbo</b>			Erosividade		
Anos Extremos	IAC	Classificação	Baixa	Média	Alta
2057	4,19	Extremamente úmido	4 meses	2 meses	6 meses
2060	-4,16	Extremamente seco	7 meses	-	5 meses
2065	-4,53	Extremamente seco	9 meses	-	3 meses
<b>Trivelato</b>			Erosividade		
Anos Extremos	IAC	Classificação	Baixa	Média	Alta
2060	-4,14	Extremamente seco	7 meses	-	5 meses
<b>Juruena</b>			Erosividade		
Anos Extremos	IAC	Classificação	Baixa	Média	Alta
2060	-4,10	Extremamente seco	7 meses	1 mês	4 meses
2089	-4,36	Extremamente seco	8 meses	-	4 meses
<b>Nova Maringá</b>			Erosividade		
Anos Extremos	IAC	Classificação	Baixa	Média	Alta
2034	4,59	Extremamente úmido	6 meses	2 meses	4 meses
2060	-4,66	Extremamente seco	7 meses	-	5 meses
2084	-4,12	Extremamente seco	8 meses	-	4 meses
2092	5,04	Extremamente úmido	6 meses	1 mês	5 meses
<b>Padronal</b>			Erosividade		
Anos Extremos	IAC	Classificação	Baixa	Média	Alta
2084	-4,54	Extremamente seco	9 meses	-	3 meses
2092	6,49	Extremamente úmido	8 meses	-	4 meses
<b>Paranatinga</b>			Erosividade		
Anos Extremos	IAC	Classificação	Baixa	Média	Alta
2046	4,79	Extremamente úmido	5 meses	-	7 meses
2065	-4,19	Extremamente seco	8 meses	1 mês	3 meses

Fonte: Autora, 2025.

Em Trivelato e Juruena, os anos extremamente secos de 2060 e 2089 apresentaram predominância de meses com baixa erosividade, ainda que com ocorrência pontual de meses erosivos, indicando que a distribuição intra-anual das chuvas continua sendo determinante. Em Nova Maringá, os anos extremamente úmidos de 2034 e 2092 contrastaram com os anos extremamente secos de 2060 e 2084. Em Padronal, o ano extremamente úmido de 2092 apresentou maior número de meses erosivos, enquanto o ano extremamente seco de 2084 concentrou meses de baixa erosividade. Em Paranatinga, o ano extremamente úmido de 2046 apresentou maior potencial erosivo mensal em comparação ao ano extremamente seco de 2065.

Já para o cenário pessimista RCP 8.5, a relação entre IAC e erosividade torna-se mais evidente (Quadro 4), com intensificação do potencial erosivo nos anos extremamente úmidos e forte redução nos anos extremamente secos, embora permaneçam eventos pontuais de alta erosividade mesmo em anos de déficit pluviométrico. Em Santarém, o ano extremamente úmido de 2061 apresentou maior concentração de meses erosivos, resultado compatível com a intensificação das chuvas projetadas para cenários de maiores emissões (Ferreira; Costa; Cruz, 2024).

Na estação Km 1326 da BR-163, os anos extremamente úmidos de 2050 e 2078 contrastaram com o ano extremamente seco de 2091, que concentrou meses pouco erosivos. Em Barra do São Manuel, os anos extremamente secos de 2087 e 2091 apresentaram predominância de meses com baixa erosividade, embora com ocorrência pontual de meses erosivos, indicando maior irregularidade na distribuição das chuvas. Na estação Km 947 da BR-163, o ano extremamente úmido de 2078 concentrou maior número de meses com erosividade elevada.

Quadro 6 - Relação IAC e Erosividade para o futuro no cenário 8.5

(continua)

<b>Santarém</b>			Erosividade		
Anos Extremos	IAC	Classificação	Baixa	Média	Alta
2061	4,58	Extremamente úmido	6 meses	2 meses	4 meses
<b>Km 1326 Br-163</b>			Erosividade		
Anos Extremos	IAC	Classificação	Baixa	Média	Alta
2050	4,30	Extremamente úmido	5 meses	1 mês	6 meses
2078	4,16	Extremamente úmido	6 meses	1 mês	5 meses
2091	-4,27	Extremamente seco	7 meses	2 meses	3 meses

Quadro 7 - Relação IAC e Erosividade para o futuro no cenário 8.5

(conclusão)

<b>Barra do São Manuel</b>			Erosividade		
Anos Extremos	IAC	Classificação	Baixa	Média	Alta
2087	-4,12	Extremamente seco	7 meses	-	5 meses
2091	-4,03	Extremamente seco	8 meses	-	4 meses
<b>Km 947 Br-163</b>			Erosividade		
Anos Extremos	IAC	Classificação	Baixa	Média	Alta
2078	4,04	Extremamente úmido	5 meses	1 mês	6 meses
<b>Cachimbo</b>			Erosividade		
Anos Extremos	IAC	Classificação	Baixa	Média	Alta
-	-	-	-	-	-
<b>Trivelato</b>			Erosividade		
Anos Extremos	IAC	Classificação	Baixa	Média	Alta
2087	-4,27	Extremamente seco	7 meses	1 mês	4 meses
<b>Juruena</b>			Erosividade		
Anos Extremos	IAC	Classificação	Baixa	Média	Alta
2087	-4,87	Extremamente seco	8 meses	1 mês	3 meses
2091	-4,55	Extremamente seco	9 meses	-	3 meses
<b>Nova Maringá</b>			Erosividade		
Anos Extremos	IAC	Classificação	Baixa	Média	Alta
2031	4,22	Extremamente úmido	6 meses	-	6 meses
2065	-4,09	Extremamente seco	7 meses	2 meses	3 meses
2087	-4,18	Extremamente seco	8 meses	-	4 meses
<b>Padronal</b>			Erosividade		
Anos Extremos	IAC	Classificação	Baixa	Média	Alta
2031	4,17	Extremamente úmido	6 meses	-	6 meses
2065	-4,26	Extremamente seco	10 meses	1 mês	1 mês
<b>Paranatinga</b>			Erosividade		
Anos Extremos	IAC	Classificação	Baixa	Média	Alta
2031	4,56	Extremamente úmido	6 meses	1 mês	5 meses
2073	5,29	Extremamente úmido	6 meses	1 mês	5 meses
2087	-4,23	Extremamente seco	9 meses	-	3 meses
2091	-4,34	Extremamente seco	9 meses	-	3 meses

Fonte: Autora, 2025.

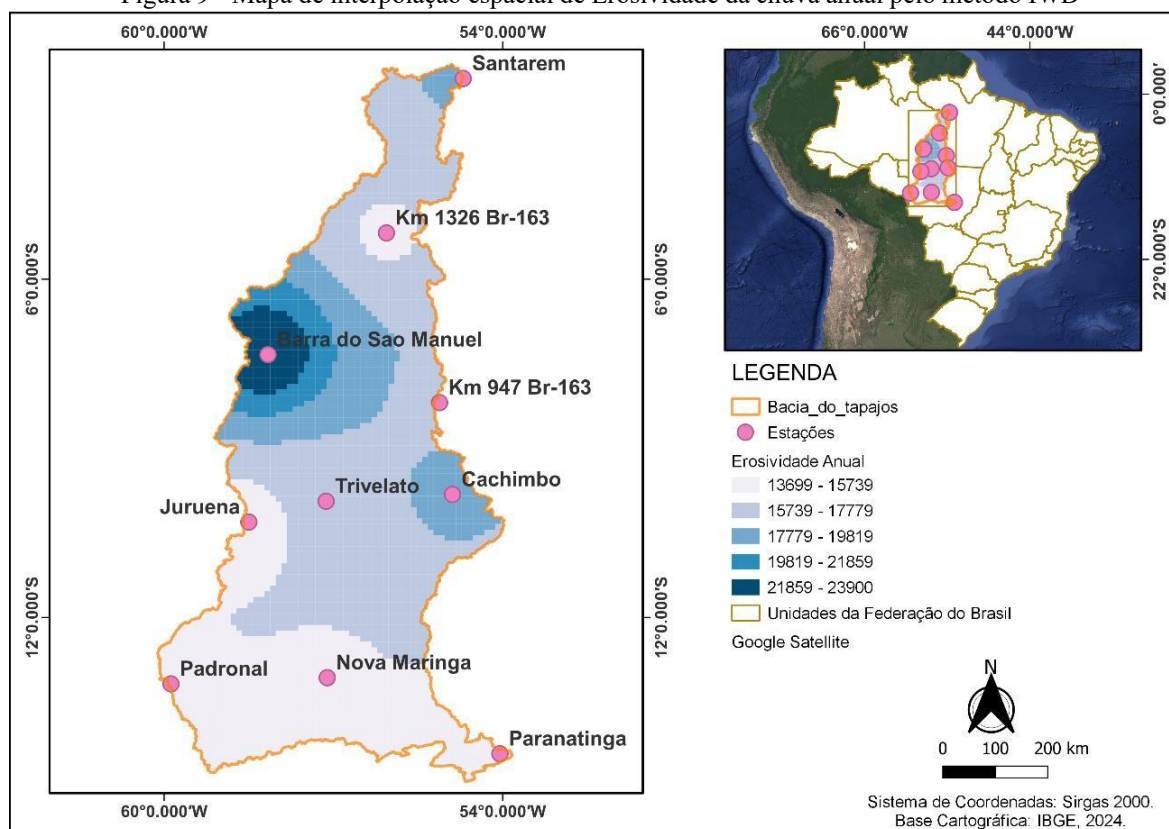
Em Trivelato e Juruena, os anos extremamente secos de 2087 e 2091 apresentaram forte predominância de meses com baixa erosividade, refletindo a redução progressiva das chuvas ao longo do primeiro semestre e sua diminuição da região Norte para o Sul do Mato Grosso (Vieira et al., 2024). Em Nova Maringá, o ano extremamente úmido de 2031 contrastou com os anos extremamente secos de 2065 e 2087. Em Padronal, o ano extremamente úmido de 2031 apresentou aumento expressivo do número de meses erosivos, enquanto o ano extremamente seco de 2065 concentrou quase todos os meses na classe de baixa erosividade. Por fim, em Paranatinga, os anos extremamente úmidos de 2031 e 2073 apresentaram maior número de meses com erosividade elevada, enquanto os anos extremamente secos de 2087 e 2091 concentraram meses pouco erosivos.

A comparação entre os anos classificados como extremos pelo IAC e o comportamento mensal da erosividade evidencia relação consistente entre anomalias pluviométricas e o potencial erosivo das chuvas, ainda que não linear. De modo geral, anos extremamente úmidos tendem a concentrar maior número de meses com erosividade elevada, enquanto anos extremamente secos apresentam predominância de meses com baixa erosividade, comportamento já esperado uma vez que anos com IAC positivo estão associados a chuvas mais intensas e maior energia cinética disponível para o processo erosivo (Ferreira; Costa; Cruz, 2024). De forma integrada, os três períodos analisados indicam que o IAC é um bom indicador do comportamento geral da erosividade ao longo do ano.

#### **4.4 IDW**

A interpolação espacial realizada pelo método IDW permitiu identificar a distribuição espacial da erosividade média anual na bacia (Figura 9), na qual os valores variaram de 13.696,41 a 23.904,63 MJ mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>, conforme apresentado na Tabela 4. Observa-se um nítido gradiente espacial, com os maiores valores concentrando-se na porção oeste da área de estudo, especialmente na estação localizada no estado do Amazonas. Esses resultados indicam a predominância de classes elevadas de erosividade nessa região, refletindo maior potencial para a ocorrência de processos erosivos.

Figura 9 - Mapa de interpolação espacial de Erosividade da chuva anual pelo método IWD



Fonte: Autora, 2025.

Tabela 4 – Média anual de Erosividade da BHRT

<b>Estações</b>	<b>Erosividade Anual (MJ mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>)</b>
Santarém	17926,61
Km 1326 Br-163	15367,68
Barra do São Manuel	23904,63
Km 947 Br-163	17501,37
Cachimbo	18320,83
Trivelato	16776,18
Juruena	14490,09
Nova Maringá	15355,36
Padronal	15417,55
Paranatinga	13696,41

Fonte: Autora, 2025.

Esse padrão espacial está diretamente associado às maiores intensidades e volumes de precipitação registrados nesses setores da bacia, evidenciando a forte influência do regime pluviométrico e das condições atmosféricas regionais sobre a variabilidade espacial da erosividade das chuvas. Resultados semelhantes foram observados por Silva Neto et al. (2025), que classificou a erosividade anual no município de Codajás–AM como muito alta em todo o território municipal, evidenciando o elevado potencial erosivo associado ao regime pluviométrico da região amazônica. Essa concordância reforça que áreas amazônicas, caracterizadas por elevados volumes e intensidades de chuva, tendem a apresentar maior capacidade de desagregação do solo e, conseqüentemente, maior suscetibilidade aos processos erosivos.

A utilização do IDW mostrou-se adequada por considerar a influência espacial das estações mais próximas, permitindo representar de forma contínua a variabilidade da erosividade na área. Contudo, é importante destacar que o método depende diretamente da distribuição espacial dos pontos amostrais; assim, regiões com menor densidade de estações podem apresentar maior incerteza na estimativa, devendo os resultados ser interpretados com cautela. De acordo com Ferreira Filho et al. (2019), a escolha do método de interpolação deve considerar as características do fenômeno estudado, sendo fundamental avaliar previamente quais técnicas são mais adequadas para a área e para o tipo de dado analisado. Dessa forma, os autores destacam a importância de verificar a eficiência dos métodos adotados por meio da comparação entre os valores estimados e os observados, assegurando a confiabilidade dos resultados obtidos.

## 5 CONCLUSÃO

A análise do comportamento pluviométrico e da erosividade das chuvas na Bacia Hidrográfica do Rio Tapajós permitiu identificar elevada variabilidade climática ao longo do período presente, com alternância entre anos extremamente úmidos e extremamente secos em todas as estações avaliadas. Os resultados confirmam que a erosividade das chuvas acompanha de forma consistente a sazonalidade da precipitação, apresentando maiores valores durante o período chuvoso e redução significativa na estação seca.

Nos cenários futuros RCP 4.5 e RCP 8.5, observou-se a manutenção do padrão sazonal da erosividade, porém com intensificação dos valores máximos, especialmente no cenário mais pessimista. A análise do Índice de Anomalia da Chuva indicou aumento da frequência e da severidade de eventos extremos, com destaque para a intensificação de secas severas em algumas estações e para o aumento de eventos chuvosos intensos em outras, evidenciando heterogeneidade espacial na resposta climática da bacia.

A relação entre o IAC e a erosividade mostrou-se consistente nos três períodos analisados, indicando que anos extremamente úmidos tendem a concentrar maior número de meses com elevado potencial erosivo, enquanto anos extremamente secos apresentam predominância de meses com baixa erosividade, embora eventos erosivos pontuais ainda possam ocorrer. A interpolação espacial evidenciou maior erosividade média anual nas porções oeste e norte da BHRT, associada às maiores intensidades e volumes de precipitação nessas áreas. Dessa forma, os resultados obtidos confirmam que as mudanças projetadas no regime de chuvas podem intensificar os processos erosivos na BHRT, sobretudo sob o cenário RCP 8.5, reforçando a necessidade de atenção ao planejamento ambiental, ao manejo do solo e à gestão dos recursos hídricos na região.

## REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: informe 2020**. Brasília: ANA, 2020. 118 p. Disponível em: [https://biblioteca.ana.gov.br/sophia\\_web/acervo/detalhe/87742](https://biblioteca.ana.gov.br/sophia_web/acervo/detalhe/87742). Acesso em: 3 nov. 2025.
- ALEMAN, J. C. *et al.* Tree cover in Central Africa: determinants and sensitivity under contrasted scenarios of global change. **Scientific reports**, v. 7, n. 1, p. 41393, 2017.
- ALLEN, M. *et al.* Technical Summary: Global warming of 1.5 C. *An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5 C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*. 2019.
- ARAÚJO, L. *et al.* Análise climática da bacia do rio Paraíba-índice de anomalia de chuva (IAC). **Engenharia Ambiental: Pesquisa e Tecnologia**, v. 6, n. 3, 2009.
- ARAGÃO, L. E. O. C. *et al.* Incêndios relacionados à seca no século XXI contrabalançam o declínio das emissões de carbono do desmatamento da Amazônia. **Nature communications**, v. 9, n. 1, p. 536, 2018.
- BARATTO, P. F. B.; ALBUQUERQUE, J. A.; CAMPOS, C. G. C. Interpolação espacial: geoprocessamento aplicado à detecção de mudanças climáticas em Santa Catarina. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 37, p. 275-301, 2025.
- BATJES, N. H. Global assessment of land vulnerability to water erosion on a ½ by ½ grid. **Land Degradation & Development**, v. 7, n. 4, p. 353-365, 1996.
- BENTES, K. L. S.; OLIVEIRA, L. L.; ZACARDI, D. M.; BARRETO, N. J. C. A relação entre a variação hidrológica e os recursos pesqueiros no baixo Amazonas, Santarém, Pará. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.11, p.234-238, 2018.
- BRASIL. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). **Hidroweb: séries históricas**. Brasília: ANA, [s.d.]. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>. Acesso em: 6 out. 2025.
- CAPISTRANO, V. B. *et al.* Overview of climate change in the BESM-OA2. 5 climate model. **Geoscientific Model Development**, v. 12, p. 1613-1642, 2018.
- CAPISTRANO, V. B. *et al.* Assessing the performance of climate change simulation results from BESM-OA2.5 compared with a CMIP5 model ensemble. **Geoscientific Model Development**, v. 13, n. 5, p. 2277-2296, 2020.
- CARVALHO, A. A. S. *et al.* Desafios da gestão hídrica no Baixo Amazonas: uma revisão narrativa. *In: RECURSOS HÍDRICOS: GESTÃO, PLANEJAMENTO E TÉCNICAS EM PESQUISA – VOLUME 2*. Editora Científica Digital, 2022. p. 51-64.

COSTA, C. E. A. S.; BLANCO, C. J. C.; OLIVEIRA JÚNIOR, J. F. Impact of climate change in the flow regimes of the Upper and Middle Amazon River. **Climatic Change**, v. 166, n. 3, p. 1-22, 2021.

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

COSTA, C. E. A. de S.; BLANCO, C. J. C. Influência da variabilidade climática sobre a erosividade em Belém (PA). **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 33, n. 3, p. 509-520, 2018.

FARINOSI, F. *et al.* Future climate and land use change impacts on river flows in the Tapajós Basin in the Brazilian Amazon. **Earth's Future**, v. 7, n. 8, p. 993-1017, 2019.

FERREIRA FILHO, D. F. *et al.* Aplicação de técnicas de interpolação para espacialização de chuvas: calha norte-PA. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 24, 2019.

FERREIRA, L. C. V. *et al.* Os índices de anomalia de chuva e sua relação com o ENOS na bacia do Tapajós. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 17, p. e169111738004, 2022.

FERREIRA, L. C. V.; COSTA, C. E. A. S.; CRUZ, J. S. Projeções futuras de chuvas e potencial erosivo na bacia do Tapajós. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 35, n. 20, p. 45-64, 2024.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Geneva: IPCC, 2023. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>. Acesso em: 1 nov. 2025.

LULU, J. *et al.* **Boletim agrometeorológico: anomalias de chuva de 1988 a 2022 em Mato Grosso (1ª e 2ª safras)**. Cuiabá: Embrapa Agrossilvipastoril, 2022.

MARTINS, W. L. D.; BLANCO, C. J. C.; MELO, A. M. Q. de. Potencial erosivo das chuvas no Maranhão e Pará. **Geoambiente On-line**, n. 36, p. 1-18, 2020.

MONTE, B. E. O. *et al.* Terminology of natural hazards and disasters: review and Brazil case. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v. 52, p. 101970, 2021.

MORAIS, L. F. B. *et al.* Índice EI30 e coeficiente de chuva do sudoeste de Mato Grosso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 3, p. 339-344, 1991.

NERY, J. T.; SIQUEIRAS, B. Índice de anomalia de chuva aplicado no Paraná. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 27, p. 772-788, 2020.

OLIVEIRA, I. S. de *et al.* A influência do potencial erosivo da chuva e da mudança do uso e cobertura da terra nos desastres ambientais em Belém, Pará. **ACTA GEOGRÁFICA**, v. 19, n. 52, p. 18-37, 2025.

OLIVEIRA, L. L. de *et al.* Efeitos dos eventos extremos climáticos na variabilidade hidrológica em rio amazônico. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 11, n. 4, p. 145-153, 2020.

OLIVEIRA JÚNIOR, R. C.; MEDINA, B. F. A erosividade das chuvas em Manaus (AM). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 14, p. 235-239, 1990.

OLIVEIRA, T.; TAVARES, C.; FERREIRA, C. O evento extremo de precipitação de 09/12/2016: da gênese aos impactos do evento no perímetro urbano de Juiz de Fora (MG). **Revista de Ciências Humanas**, v. 1, n. 21, 2021.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS NO BRASIL (ONU). **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável**. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 10 nov. 2025.

RIQUETTI, N. B. *et al.* Rainfall erosivity in South America: Current patterns and future perspectives. **Science of the Total Environment**, v. 724, p. 138315, 2020.

ROCHA, V. M.; CORREIA, F. W. S.; GOMES, W. B. Impactos do clima na precipitação amazônica RCP 8.5. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 12, n. 6, p. 2051-2065, 2019.

ROSA, A. G.; SOUSA, A. M. L. Erosividade da chuva em Óbidos-PA. **Revista GeoAmazônia**, v. 6, n. 11, p. 256-272, 2018.

SILVA, A. M. *et al.* Rainfall erosivity map for Brazil. **Catena**, v. 57, n. 3, p. 251-259, 2004.

SILVA, J. F. B. R. da *et al.* Índice de anomalia de chuva (IAC) e sua relação com os desastres naturais no leste da Amazônia. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 15, n. 5, p. 2544-2572, 1 ago. 2022.

SILVA, M. N. A. *et al.* Homogeneidade e tendência das precipitações na bacia do Tapajós. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 33, n. 4, p. 665-675, 2018.

SILVA NETO, J. C. A. da *et al.* Chuvas erosivas na Amazônia: a utilização de dados CHIRPS para determinação da erosividade no município de Codajás, Amazonas. **ACTA GEOGRÁFICA**, v. 19, n. 53, p. 123-143, 2025.

SOUSA, E. S.; SANTOS, V. C.; COSTA, C. E. A. S. Influência de fenômenos climáticos nas vazões do Tapajós. **Holos Environment**, v. 22, n. 1, p. 18-30, 2022.

TEIXEIRA, D. B. S. *et al.* Rainfall erosivity over Brazil. **Science of the Total Environment**, v. 891, p. 164557, 2023.

THE NATURE CONSERVANCY BRASIL. Conservação da Bacia do Tapajós. 2019. Disponível em:

<https://www.tnc.org.br/content/dam/tnc/nature/en/documents/brasil/conservacaobaciatapajos-metodologia.pdf>. Acesso em: 3 nov. 2025.

VAN ROOY, M. P. A rainfall anomaly index independent of time and space, notes. 1965.

VIEIRA, R. N. *et al.* Análise da Variabilidade Climática na Cidade de Campo Verde, Mato Grosso. **UNICIÊNCIAS**, v. 28, n. 1, p. 02-05, 2024.

WANG, L. *et al.* Rainfall erosivity index for global erosion monitoring. **Catena**, v. 234, p. 107593, 2024.