Revista Brasileira de Climatologia
Brazilian Journal of Climatology
OPEN ACCESS
LFGD Editora

PROJEÇÕES FUTURAS DE CHUVAS E SEU POTENCIAL EROSIVO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO TAPAJÓS

Future projections of rainfall and its erosive potential in the Tapajós River basin

Proyecciones futuras de precipitaciones y su potencial erosivo en la cuenca del río Tapajós

Luandra Caroline Veloso Ferreira
Universidade Federal do Pará
luandra.ferreira@tucurui.ufpa.br

Carlos Eduardo Aguiar de Souza Costa
Universidade Federal do Pará
cecosta@ufpa.br

Josias da Silva Cruz
Universidade Federal do Pará
josias.cruz75@gmail.com

Resumo: A Bacia Hidrográfica do Rio Tapajós (BHRT), uma das maiores do Brasil, enfrenta desafios decorrentes da atividade de garimpo e erosão de suas margens, além de projetos de grande porte, como portos fluviais, que aumentarão a população local. Este estudo investiga as mudanças nas precipitações na região da BHRT, uma área altamente vulnerável às mudanças climáticas. Com foco no presente e em cenários climáticos futuros, como os RCPs (Representative Concentration Pathways) 4.5 e 8.5, calculou-se a Erosividade da Chuva e Índice de Anomalia da Chuva (IAC) para avaliar a erosão do solo e a variabilidade das chuvas, possíveis agravantes da fragilidade ambiental da área. Os resultados revelam que a erosividade é maior em Santarém do que em Paranatinga, e que anos com IAC positivo são mais erosivos do que anos com IAC negativo, tanto no presente quanto no futuro. É que é necessário investigar os efeitos das mudanças climáticas na bacia do rio Tapajós, considerando outras variáveis e modelos climáticos, e de desenvolver estratégias de adaptação e mitigação dos riscos ambientais.

Palavras-chave: Erosividade. Índice de Anomalia da Chuva. Modelos Climáticos. Tapajós.

Abstract: The Tapajós River Hydrographic Basin (BHRT), one of the largest in Brazil, faces challenges arising from mining activity and erosion of its banks, in addition to large-scale projects, such as river

ports, which will increase the local population. This study investigates changes in precipitation in the BHRT region, an area highly vulnerable to climate change. Focusing on the present and future climate scenarios, such as RCPs (Representative Concentration Pathways) 4.5 e 8.5, Rain Erosivity and Rain Anomaly Index (IAC) were calculated to evaluate soil erosion and rainfall variability, possible aggravating factors of environmental fragility. of the area. The results reveal that erosivity is greater in Santarém than in Paranatinga, and that years with positive IAC are more erosive than years with negative IAC, both in the present and in the future. It is necessary to investigate the effects of climate change in the Tapajós River basin, considering other variables and climate models, and to develop adaptation and mitigation strategies for environmental risks.

Keywords: Erosivity. Rain Anomaly Index. Climate Models. Tapajós.

Resumen: La Cuenca Hidrográfica del Río Tapajós (BHRT), una de las más grandes de Brasil, enfrenta desafíos derivados de la actividad minera y la erosión de sus orillas, además de proyectos de gran escala, como puertos fluviales, que aumentarán la población local. Este estudio investiga los cambios en las precipitaciones en la región BHRT, un área altamente vulnerable al cambio climático. Centrándose en los escenarios climáticos presentes y futuros, como los RCPs (Representative Concentration Pathways) 4.5 e 8.5, se calcularon el Índice de Erosividad de la Lluvia y de Anomalía de la Lluvia (IAC) para evaluar la erosión del suelo y la variabilidad de las precipitaciones, posibles agravantes de la fragilidad ambiental de la zona. Los resultados revelan que la erosividad es mayor en Santarém que en Paranatinga, y que los años con IAC positivo son más erosivos que los años con IAC negativo, tanto en el presente como en el futuro. Es necesario investigar los efectos del cambio climático en la cuenca del río Tapajós, considerando otras variables y modelos climáticos, y desarrollar estrategias de adaptación y mitigación de los riesgos ambientales.

Palabras clave: Erosividad. Índice de anomalías de lluvia. Modelos climáticos. Tapajós.

Submetido em: 06/02/2024
Aceito para publicação em: 10/07/2024
Publicado em: 19/07/2024

1. INTRODUÇÃO

A Bacia Hidrográfica do Rio Tapajós (BHRT) está sofrendo com a alteração em suas águas superficiais, possivelmente pelo garimpo ou erosão das suas margens. Ela é também uma das bacias que possui maior potencial de geração de energia elétrica do Brasil, com uma área de 764.183 km², quase o tamanho da Suécia e Noruega juntas (FEARNSIDE, 2015). Outras obras de grande porte estão previstas para o futuro, como a construção de portos fluviais para escoamento de grãos, fazendo com que a população aumente nos próximos anos (MELO; VIEIRA; CORDEIRO, 2017). O rio Tapajós e seus afluentes são foco de planos do Ministério dos Transportes, que pretende convertê-lo em hidrovia para transporte de soja do Mato Grosso até portos no rio Amazonas.

A crescente preocupação com as mudanças climáticas trouxe esforços globais, não somente para mitigar os seus impactos diretos, mas também gerenciar e adaptar as estruturas hidráulicas (existentes ou não). Dentre todas, as alterações nas precipitações, e por consequência, nas vazões de rios são as mais preocupantes, pois em geral, expõem a população a riscos associados a inundações, gerando perdas de vidas e materiais; inseguranças devido à erosão que minam obras de infraestrutura; e contaminação dos sistemas de abastecimento de água potável (HOBBIE; GRIMM, 2020). Fica claro então que o entendimento de como se comportam as precipitações, sua sazonalidade e principalmente interferências climáticas podem trazer uma maior segurança para determinadas regiões, dando suporte ao planejamento necessário (PUMO et al., 2016).

De acordo com Soito e Freitas (2011), a Amazônia e o Nordeste representam as regiões mais vulneráveis do país às mudanças climáticas. Na região Amazônica, tivemos nas últimas décadas vários eventos hidrológicos extremos, como as enchentes de 2009, 2012 e 2014, e as secas de 2005 e 2010, que alertaram sobre a vulnerabilidade climática da região. Para Marengo et al. (2009), a ocorrência de eventos extremos como estes pode variar no intervalo de dias até séculos.

Assim, é importante também compreender o comportamento futuro das chuvas, elaborando análises e mesmo prevendo cenários futuros, para poder instituir planos de adaptação e mitigação climáticas. Por exemplo, os cenários RCPs (Representative Concentration Pathways), que foram propostos pelo IPCC (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas), sendo eles: RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 e RCP 8.5. O número associado

ao RCP é o valor do fluxo radiativo ao final do século XXI em W/m² (ALEMAN et al., 2017). O cenário RCP 2.6 é o menos provável de ocorrer, enquanto o RCP 4.5 e 6.0 são cenários intermediários e desejados, ou seja, aqueles em que os países consigam controlar os níveis de emissões e o nível de CO2 na atmosfera estabilize-se logo após 2100. Entretanto, o cenário RCP 8.5 é, reconhecidamente, o que possui mais chances de ocorrência (SCHARDONG; SIMONOVIC; GARCIA, 2014).

Conforme indicado por Pinto et al. (2022), diversos índices foram desenvolvidos e adaptados para avaliar os padrões climatológicos em diferentes regiões, e um dos mais amplamente empregados, devido à sua simplicidade de cálculo, é o Índice de Anomalia de Chuva (IAC). Essas informações revestem-se de grande importância, uma vez que possibilitam a caracterização da área de estudo e a mitigação dos potenciais impactos adversos decorrentes de eventos climáticos intensos e anômalos, como os sérios prejuízos socioeconômicos e ambientais, conforme enfatizado por Lima et al. (2022).

A erosão do solo causada pela precipitação é conhecida como erosão hídrica, e as chuvas com potencial erosivo são referidas como chuvas erosivas (COSTA; BLANCO, 2018). A erosividade das chuvas está relacionada à sua intensidade, à energia cinética das gotas que atingem a superfície do solo e à capacidade de infiltração do solo. Além disso, a erosão resultante depende de vários fatores, incluindo a erodibilidade do solo, a cobertura vegetal, a inclinação do terreno e até mesmo a quantidade de água presente no solo (WISCHMEIER, 1959).

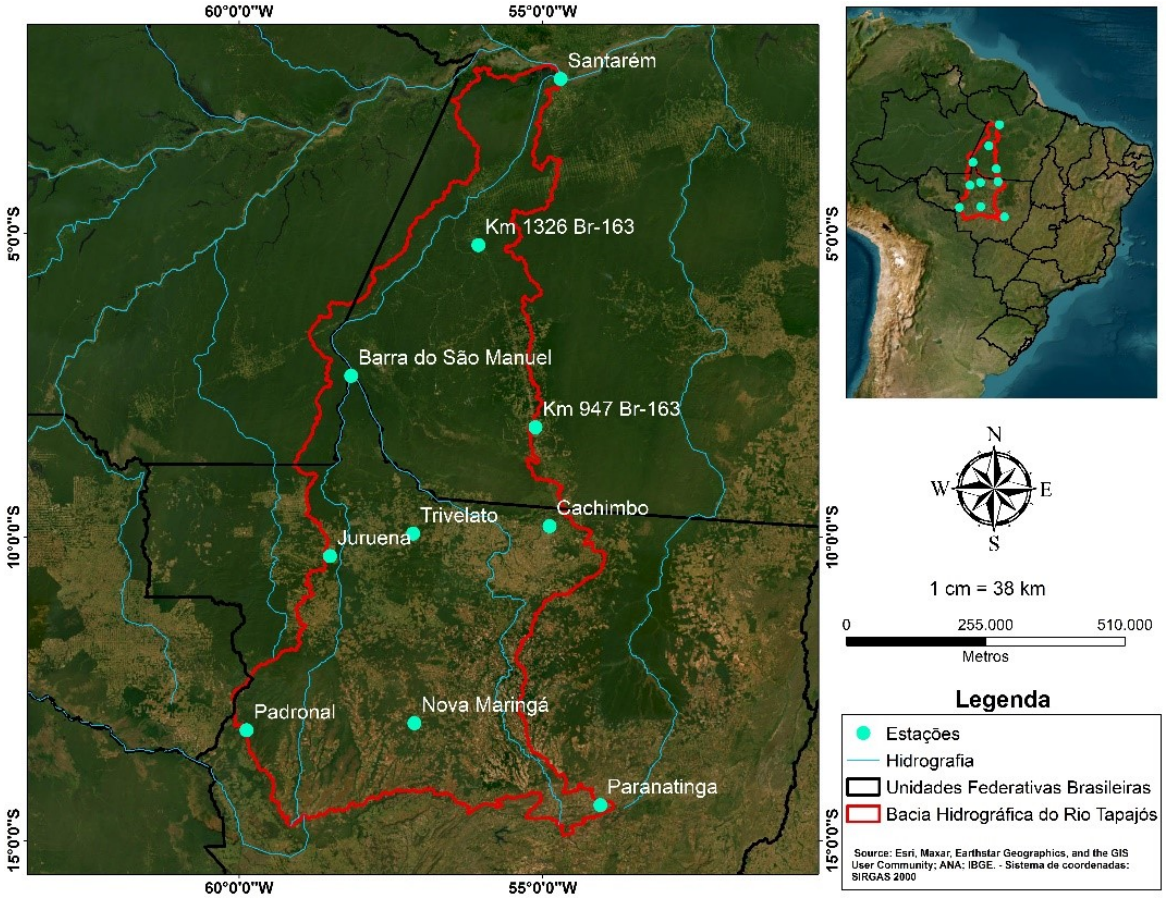
Então, a presente pesquisa justifica-se, pois, a região Amazônica sofre com carência de infraestruturas, planejamentos técnicos e políticas públicas voltadas para remediação de riscos climáticos. Esta temática vem ganhando cada vez mais atenção da comunidade científica, acarretando uma série de discussões e preocupações relacionadas aos impactos que podem ser causados. Os dados obtidos nesta pesquisa também irão auxiliar futuros estudos na área de conservação de solos, prevenção de eventos extremos (inundações, grandes secas etc.), planejamento e gestão dos recursos hídricos e variações climáticas na BHRT.

2. METODOLOGIA

2.1. Área de estudo

A área de estudo é a Bacia Hidrográfica do Rio Tapajós (BHRT), apresentada pela Figura 1. A BHRT abrange uma extensão territorial de 493.200 km² e se distribui pelos estados do Pará, Mato Grosso e uma fração do estado do Amazonas. Os principais rios afluentes do Tapajós são os rios Juruena e Teles Pires, conforme Sousa, Santos e Costa (2022).

Figura 1 - Mapa de localização da Bacia Hidrográfica do Rio Tapajós.



Fonte: Autores (2023).

Foram obtidos os dados de precipitação de 10 estações pluviométricas (Tabela 1) que possuíam registros disponíveis no site da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), por meio da plataforma HIDROWEB, e do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Esses dados foram transferidos para uma planilha eletrônica, onde foram organizados e analisados. Depois do tabelamento, dessas 10 estações, selecionaram-se duas para realizar as projeções, que apresentassem poucas falhas nos registros e que estivessem distribuídas de

forma equilibrada nas diferentes regiões da BHRT, abrangendo as áreas norte (Estação Santarém) e sul (Estação Paranatinga). Essas duas estações foram escolhidas com base em critérios de qualidade e abrangência dos dados de precipitação, mas também por demonstrar as principais diferenças no comportamento climatológico da bacia (como a diferença de biomas por exemplo).

Tabela 1– Estações Selecionadas

Estação	Código	Período
Santarém	254000	1968/2022
Km 1326 Br-163	555000	1980/2022
Barra do São Manuel	758000	1975/2022
Km 947 Br-163	855000	1977/2022
Cachimbo	954001	1984/2020
Trivelato	1057001	1982/2020
Juruena	1058003	1984/2020
Nova Maringá	1357000	1982/2021
Padronal	1359000	1983/2021
Paranatinga	1454000	1973/2021

Fonte: Autores (2023).

Para realizar as projeções futuras de precipitação pluviométrica, foram utilizadas simulações do Modelo de Circulação Geral (GCM) MIROC5 (Model for Interdisciplinary Research on Climate 5) para os cenários RCP 4.5 e 8.5, de 2021 até 2099. O modelo japonês MIROC5 foi escolhido pois projeta eficientemente a precipitação climatológica, principalmente para a área de influência da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), como é o caso da Amazônia (WATANABE et al., 2010; COSTA; BLANCO; OLIVEIRA JÚNIOR, 2021). Este modelo passa a tratar com maior exatidão os processos regionais e remotos de interesse do país, ampliando a base científica para enfrentar os desafios e consequências das mudanças globais em curso (CAPISTRANO et al., 2020; CAPISTRANO et al., 2018). Já os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 foram escolhidos por três motivos: São os principais representantes de cenários otimista e realista no futuro, são os mais utilizados em estudos científico e a ocorrência do cenário RCP 2.6 é quase improvável (COSTA; BLANCO; OLIVEIRA JÚNIOR, 2020).

2.2. Erosividade da chuva

O índice de erosividade originalmente indicado foi o EI_{30} 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, sendo que cada região possuiria uma equação específica de acordo com as suas condições regionais.

A equação de Oliveira Júnior e Medina (1990) e a equação de Morais et al. (1991) foram utilizadas para os cálculos da erosividade da BHRT (Tabela 2). Onde o MFI (Índice de Fournier Modificado) é igual a precipitação média mensal elevada ao quadrado e dividida pela precipitação média anual.

Tabela 2– 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 analisar a variação da erosão ao longo dos meses, calculou-se a média mensal das estações de todos os anos sem falhas da série histórica no presente e para os cenários futuros foram calculados o EI_{30} mensal dos anos de 2021 até 2099. Por exemplo, a média de janeiro foi obtida com os valores de erosividade de todos os janeiros da série, e assim por diante. Dessa forma, pode- se identificar quais meses apresentaram maior ou menor erosividade na série histórica. A classificação dos dados seguiu os critérios propostos pelo International Soil Reference and Information Center, que são mais apropriados para uma região com alta erosividade do solo, conforme apresentado na Tabela 3, a seguir.

Tabela 3 - Classificação da Erosividade da Chuva

Erosividade	Classe de Erosividade
R ≥ 1.250	Alta
800 < R < 1.250	Média
R ≤ 800	Baixa

Fonte: International Soil Reference and Information Center (1996).

2.3. Índice de anomalia da chuva (IAC)

Para calcula-se os Índices de Anomalia da Chuva (IAC), desenvolvido por Rooy (1965) para classificar as magnitudes das anomalias positivas e negativas sendo uma importante ferramenta de análise das precipitações, e fácil de ser calculado, foram usadas as Equações 1 para as anomalias positivas e 2 para as anomalias negativas.

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

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

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 4.

Tabela 4 - Classificação do índice de anomalia da chuva

Faixa do IAC	Classificação de intensidade
> 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. RESULTADOS

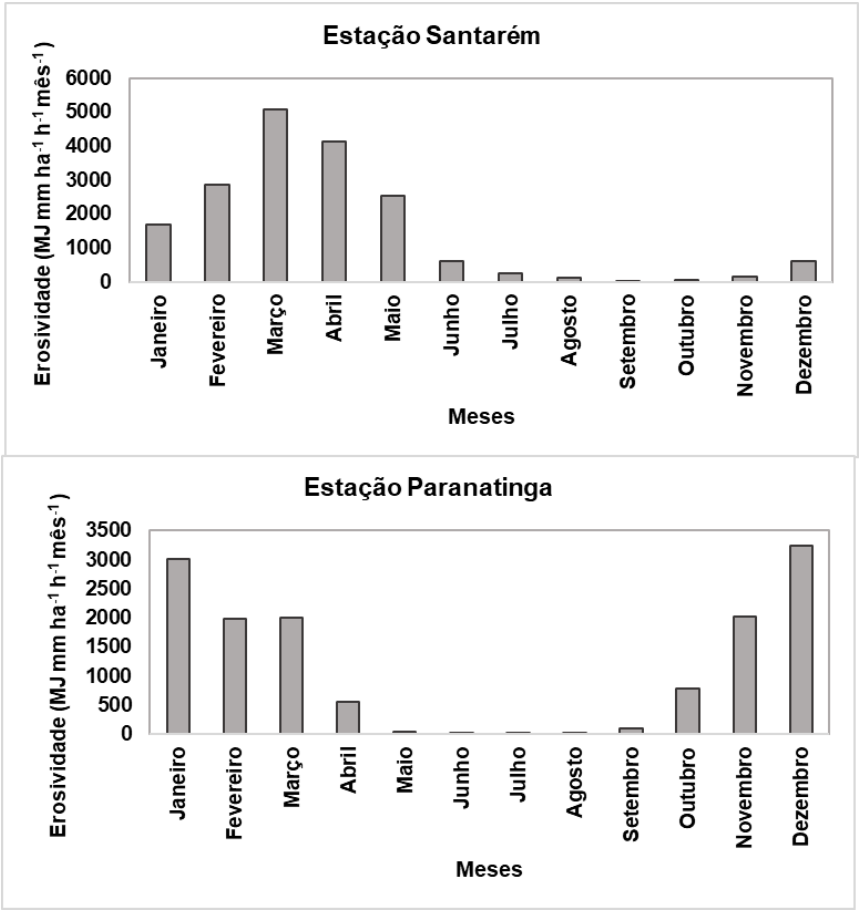
3.1. Erosividade da chuva

Serão apresentados os resultados da análise da erosividade da chuva para duas estações pluviométricas localizadas em diferentes regiões da BHRT: Santarém, no estado do Pará, e Paranatinga, no estado de Mato Grosso. Foram analisados os valores médios mensais considerado como presente (1968/2020), e para os cenários de mudanças climáticas RCP 4.5 e RCP 8.5, considerados como futuro, para o período de 2021 a 2099.

Presente para as duas estações

Na Figura 2, são apresentados os valores mensais do índice de Erosividade para o presente nas duas estações, calculado e classificado através da metodologia citada anteriormente.

Figura 2 – Gráficos das médias mensais da Erosividade da chuva para o presente (1968/2020)



Fonte: Autores (2023).

Observa-se que a maior parte dos índices mais altos de erosividade concentra-se nos meses de fevereiro até o mês de maio, sendo eles os períodos mais chuvosos da região onde está localizada a estação Santarém e na estação Paranatinga percebe-se também que as altas de erosividade ocorrem do mês de novembro até março, sendo o período de maior precipitação na região ao sul da bacia.

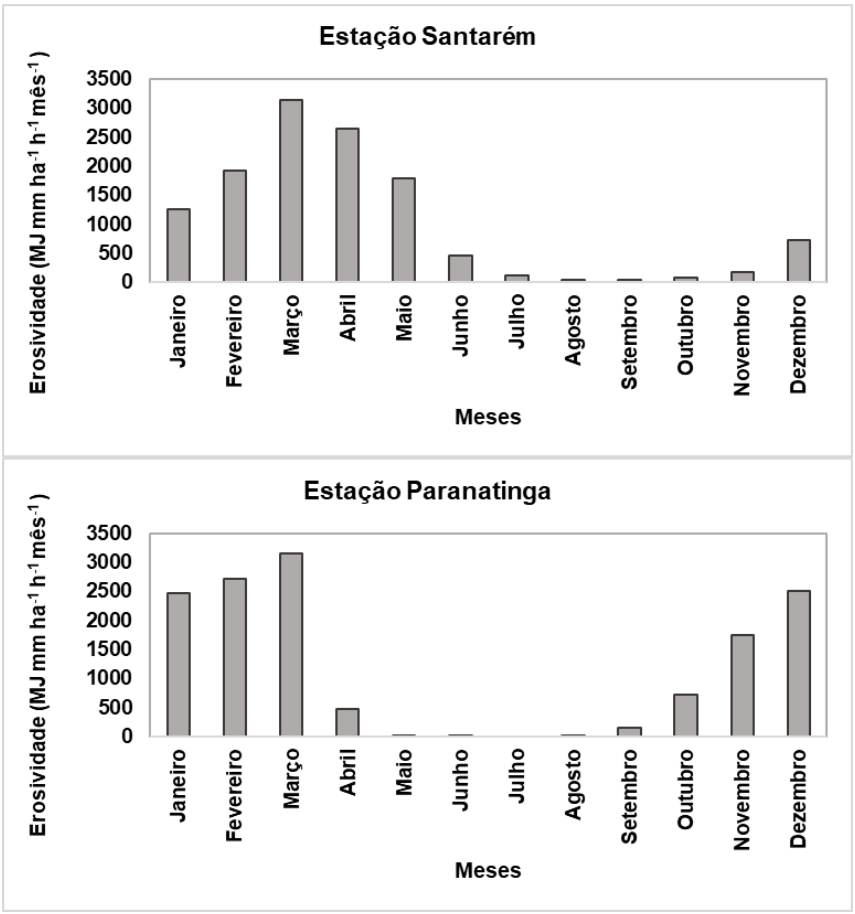
Na estação Santarém o mês de março foi o mês que teve o valor mais alto de Erosividade com índice de 5063,28 MJ mm ha^{-1} h^{-1} $mês^{-1}$ e setembro o que teve menos impacto erosivo com 36,09 MJ mm ha^{-1} h^{-1} $mês^{-1}$. Segundo Pessoa, Rodrigues e Ferreira Filho (2022), o mês de março apresentou o maior potencial de erosivo no estado do Pará, devido à alta intensidade e quantidade de chuvas, enquanto os meses de agosto e setembro foram os menos erosivos.

Já para a estação Paranatinga o mês de dezembro foi o mais erosivo que obteve maior índice de erosão chegando a 3247,19 MJ mm ha^{-1} h^{-1} $mês^{-1}$, e o mês de julho o menos erosivo com valor somente de 2,48 MJ mm ha^{-1} h^{-1} $mês^{-1}$.

Futuro para as duas estações

Para o cenário RCP 4.5 como observou-se na Figura 3, que na estação Santarém do mês de janeiro até o mês de maio serão os meses de mais altos índices de erosividade, sendo março o mês que mais ocorrerá erosão com o índice de 3133,57 MJ mm ha^{-1} h^{-1} $mês^{-1}$ e o menos provável será setembro com 37,35 MJ mm ha^{-1} h^{-1} $mês^{-1}$ nos anos de 2021 a 2099.

Figura 3 – Gráficos das médias mensais da Erosividade da chuva para o cenário RCP 4.5



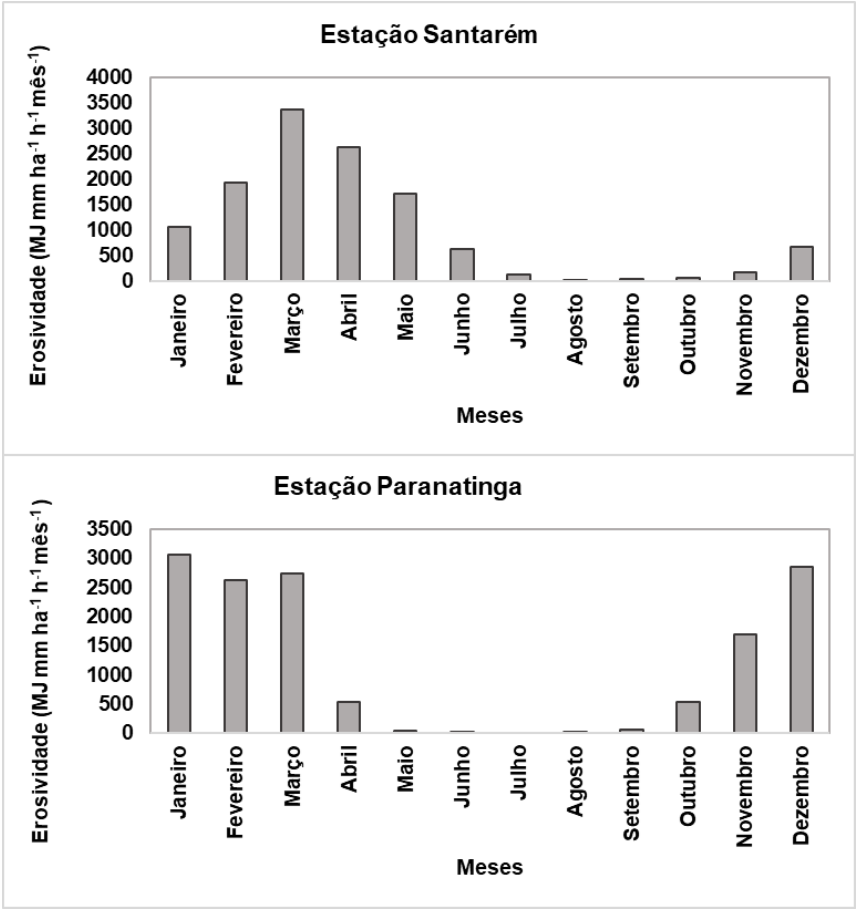
Fonte: Autores (2023).

Já para a estação Paranatinga os meses mais erosivo ocorrerão de novembro a março, sendo março o mês que será mais erosivo com valor médio da erosividade de 3159,15 MJ mm ha^{-1} h^{-1} $mês^{-1}$ e somente em julho a erosividade será zero, sendo o único mês a não apresentar chuvas erosivas de 2021 a 2099. De acordo com Rosa et al. (2007, p. 25), a precipitação na parte central do Mato Grosso apresenta uma irregularidade ao longo do ano, com o verão sendo a época mais chuvosa e o inverno a mais seca. A maior parte das chuvas (70%) se concentra entre novembro e março, correspondendo ao verão, sendo que janeiro, fevereiro e março são os meses mais úmidos. Já no inverno, as chuvas são muito raras e ocorrem em apenas quatro ou cinco dias nos meses de junho, julho e agosto, com valores entre 20 e 80 mm.

Já no cenário RCP 8.5 percebe-se na Figura 4 que os mais altos índices de erosividade ocorrerão entre os meses de janeiro a maio, sendo março também o mês com maior potencial erosivo com erosividade de 3367,86 MJ mm ha^{-1} h^{-1} $mês^{-1}$ e o mês de agosto o menos provável

de ocorrer erosão com valor médio de 22,66 MJ mm ha^{-1} h^{-1} $mês^{-1}$ na estação Santarém nos anos observados. De acordo com Pessoa, Rodrigues e Ferreira Filho (2022), as mesorregiões do Marajó, Metropolitana de Belém e Nordeste Paraense apresentaram os maiores índices de erosividade de chuva no período mais chuvoso, com valores muito altos em todos os meses de janeiro a abril. Em maio, a situação se manteve crítica na mesorregião Metropolitana de Belém e em quase toda a extensão das mesorregiões do Marajó e Nordeste Paraense sendo classificadas com erosividade de chuva muita alta.

Figura 4 – Gráficos das médias mensais da Erosividade da chuva para o cenário 8.5



Fonte: Autores (2023).

Na estação Paranatinga de novembro a março apresentou valores maiores de erosividade sendo para esse cenário o mês de janeiro o mês de maior potencial erosivo com média de 3065,65 MJ mm ha^{-1} h^{-1} $mês^{-1}$ e o mês de julho o único mês a não apresentar chuvas erosivas, com valor de erosividade zero entres os anos estudados.

Conforme Salton, Comunello e Fietz (2012), a erosividade da chuva no estado de Mato Grosso apresenta variações mensais, sendo mais baixa nos meses de junho, julho e agosto, sem levar em conta as diferenças regionais do estado.

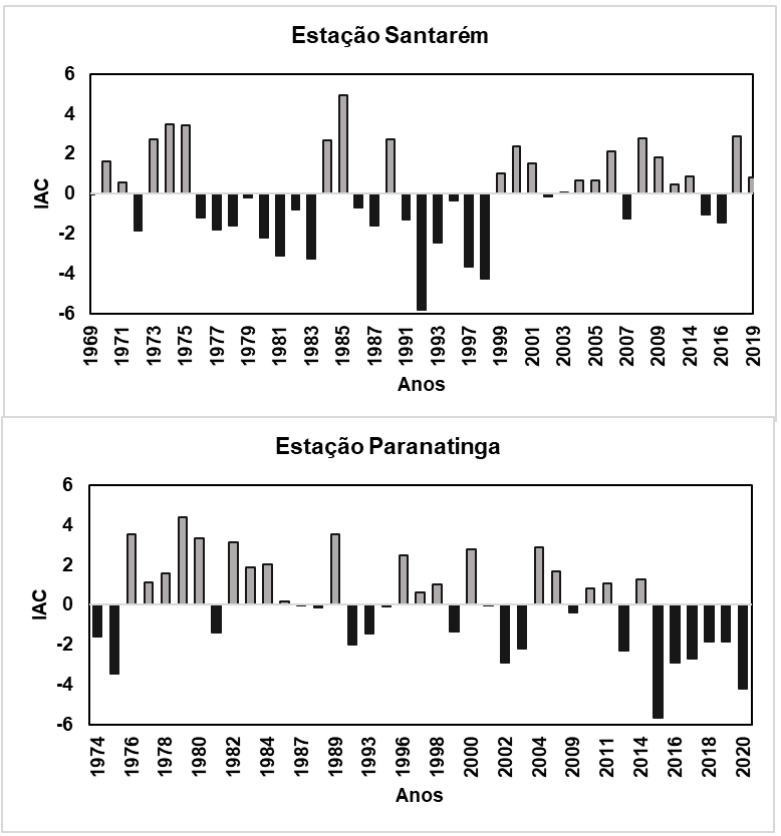
3.2. IAC

Para analisar o grau de intensidade e de duração dos períodos secos e chuvosos nas duas estações pluviométricas Santarém e Paranatinga, calculou-se o IAC para o presente e para o futuro nos dois cenários RCP 4.5 e 8.5.

Presente para as duas estações

Na Figura 5, observou-se que na estação Santarém ocorrem 21 anos de anomalias positivas e 22 anos de anomalias negativas, ocorrendo eventos extremos nos anos de 1985 (extremamente chuvoso), 1992 e 1998 (extremamente secos).

Figura 5 – Gráficos do IAC para o presente.



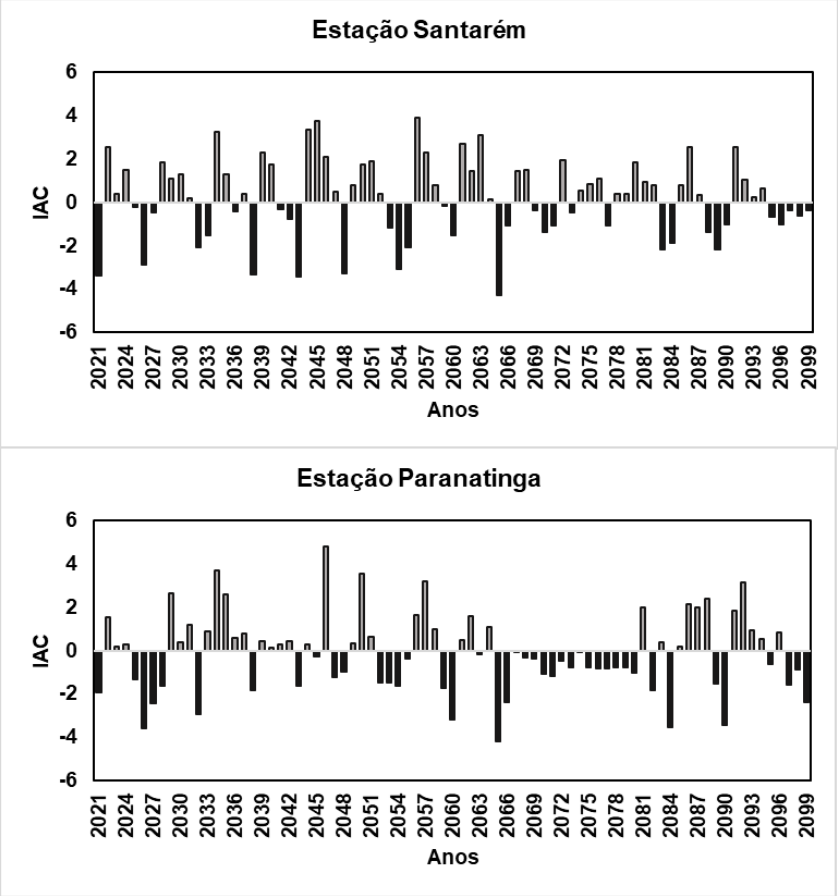
Fonte: Autores (2023).

Já na estação Paranatinga verificou-se que 19 anos positivos e 20 anos negativos. Sendo o ano de 1979 foi extremamente chuvoso e os anos de 2015 e 2020 de extrema seca. Lulu et al. (2022), analisaram as anomalias de chuva no Mato Grosso entre 1988 e 2022 e constataram que, em nove anos, o mês de janeiro apresentou condições de seca, sendo que o ano de 2015 foi o mais crítico, classificado como extremamente seco.

Futuro para as duas estações

Percebe-se que para o cenário 4.5 na estação Santarém ocorrerão 45 anos positivos contra 34 anos negativos, ocorrendo extrema somente no ano de 2065 classificado como um ano extremamente seco, como pode-se observar na Figura 6.

Figura 6 – Gráficos do IAC para o cenário RCP 4.5

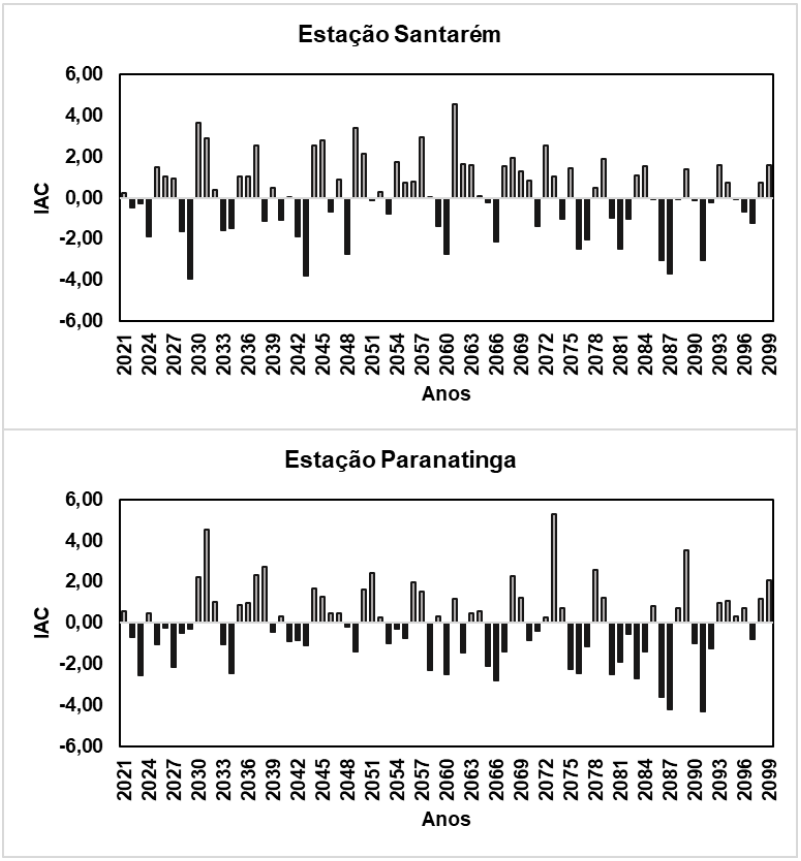


Fonte: Autores (2023).

Para a estação Paranatinga no sudeste da bacia ocorrerão 37 anos de índices positivos e 42 anos de índices negativos, havendo dois anos extremos, sendo o ano de 2046 extremamente úmido e o ano de 2065 extremamente seco.

No cenário 8.5 notou-se que ocorrerá mais anos úmidos que anos secos, sendo 43 anos positivos e 34 anos negativos na estação Santarém, havendo severidade de chuvas somente em 2061 que será um ano extremamente úmido, como mostra a Figura 7.

Figura 7 – Gráficos do IAC para o RCP 8.5



Fonte: Autores (2023).

E na estação Paranatinga serão 39 anos positivos e 40 negativos, onde os anos de 2031 e 2073 serão extremamente úmidos e os anos de 2087 e 2091 serão extremamente secos.

3.3. Relação entre a erosividade da chuva e o IAC

Selecionou-se os anos que ocorreram eventos extremos para comparar a relação entre a erosividade da chuva e o IAC, no presente e para os cenários futuros. Na Tabela 5

observa-se que na estação Santarém os anos de 1992 e 1998 foram anos extremamente secos e de baixo impacto erosivo.

Tabela 5 – Relação Erosividade e o IAC para o presente

Anos	IAC (Presente)	Erosividade (Presente)
Santarém		
1985	Extre. Úmido	6 meses (Baixa); 6 meses (alta)
1992	Extre. Seco	9 meses (Baixa); 1 mês (média); 2 meses (alta)
1998	Extre. Seco	8 meses (Baixa); 1 mês (média); 3 meses (alta)
Paranatinga		
1979	Extre. Úmido	7 meses (Baixa); 1 mês (média); 4 meses (alta)
2015	Extre. Seco	9 meses (Baixa); 3 meses (alta)
2020	Extre. Seco	9 meses (Baixa); 1 mês (média); 2 meses (alta)

Fonte: Autores (2023).

Para estação Paranatinga os anos de 2015 e 2020 foram anos também de extrema seca, onde para ambos ocorreram nove meses de erosividade baixa. De acordo com os resultados de Ferreira et al. (2022), nos anos de 1992 e 1998 teve-se forte influência de El Niño (EN) e em 2015 ocorreu EN fraco o que pode ter influenciado nos eventos extremos que ocorreram para esses anos, indicando que os efeitos do ENOS influenciam no regime pluvial na Amazônia (COSTA et al., 2013).

Para o cenário futuro 4.5 prevê que em 2065 será um ano extremamente seco tanto na estação Santarém como na estação Paranatinga, onde ocorrerão mais meses de baixa erosividade. No ano de 2046 será um ano de muita chuva e percebe-se que terão mais meses erosivos para esse mesmo ano como mostra a Tabela 6.

Tabela 6 – Relação Erosividade e o IAC para o cenário RCP 4.5

Anos	IAC (4.5)	Erosividade (4.5)
Santarém		
2065	Extre. Seco	9 meses (Baixa); 3 meses (alta)
Paranatinga		
2046	Extre. Úmido	5 meses (Baixa); 7 meses (alta)
2065	Extre. Seco	8 meses (Baixa); 1 mês (média); 3 meses (alta)

Fonte: Autores (2023).

No cenário 8.5 como apresenta a Tabela 7, observamos que os anos de 2087 e 2091 na estação Paranatinga serão anos de extrema seca e de baixo potencial erosivo.

Tabela 7 - Relação Erosividade e o IAC para o cenário RCP 8.5

Anos	IAC (8.5)	Erosividade (8.5)
Santarém		
2061	Extre. Úmido	6 meses (Baixa); 2 meses (média); 4 meses (alta)
Paranatinga		
2031	Extre. Úmido	6 meses (Baixa); 1 mês (média); 5 meses (alta)
2073	Extre. Úmido	6 meses (Baixa); 1 mês (média); 5 meses (alta)
2087	Extre. Seco	9 meses (Baixa); 3 meses (alta)
2091	Extre. Seco	9 meses (Baixa); 3 meses (alta)

Fonte: Autores (2023).

Anos com IAC positivo, indicando chuvas acima da média, geralmente têm uma erosividade da chuva mais alta. Isso ocorre porque as chuvas intensas tendem a transportar mais energia cinética, o que aumenta o potencial de erosão do solo. Segundo Aksoy e Kavvas (2005), os períodos chuvosos podem elevar a taxa de erosão. Por outro lado, anos com IAC negativo, indicando chuvas abaixo da média, tendem a ter erosividade da chuva mais baixa. Isso ocorre porque as chuvas menos intensas têm menos energia para erosão.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise detalhada dos padrões de erosividade e precipitação nas estações de Santarém e Paranatinga fornece *insights* valiosos sobre a dinâmica climática dessas regiões. A concentração dos índices mais altos de erosividade durante os períodos mais chuvosos, de fevereiro a maio em Santarém e de novembro a março em Paranatinga, destaca a influência direta da sazonalidade das chuvas na erosão do solo. A variação interanual observada, com anos extremamente chuvosos alternando com anos de seca, ressalta a natureza cíclica e imprevisível do clima nessas áreas. A análise dos anos positivos e negativos, juntamente com a identificação de eventos extremos, como El Niño, destaca a importância de considerar os fenômenos climáticos globais na compreensão dos padrões locais de precipitação e erosão.

Além disso, a projeção de cenários futuros, especialmente sob o cenário RCP 8.5, sugere um aumento na frequência de anos úmidos, o que pode ter impactos significativos na

erosão do solo e na gestão ambiental dessas regiões. No entanto, é importante ressaltar que essas projeções estão sujeitas a incertezas e podem variar dependendo de diversos fatores, incluindo ações de mitigação e adaptação. Portanto, a compreensão dos padrões climáticos locais e sua interação com os cenários globais de mudança climática são essenciais para o desenvolvimento de estratégias de manejo sustentável do solo e recursos hídricos nessas regiões, visando a redução da erosão e a promoção da resiliência ambiental.

Ressalta-se a importância contínua da pesquisa e monitoramento climático para informar políticas e práticas que promovam a sustentabilidade ambiental e a adaptação às mudanças climáticas. Por isso é necessário investigar os efeitos das mudanças climáticas na BHRT, considerando outras variáveis e modelos climáticos, e de desenvolver estratégias de adaptação e mitigação dos riscos ambientais.

REFERÊNCIAS

ANA. Agência Nacional de Águas. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>. Acesso em: 15 set. 2022.

AKSOY, H.; KAVVAS, M. L. A Review of Hillslope and Watershed Scale Erosion and Sediment Transport Models. **CATANA**, vol. 64, p. 247-271, 2005.

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.

ARAÚJO, L. E. *et al*. Analise climática da bacia do rio Paraíba-índice de anomalia de chuva (IAC). **Engenharia Ambiental: Pesquisa e Tecnologia**, v. 6, n. 3, 2009.

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.

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.

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

COSTA, D. C. *et al*. Potencial erosivo e índice de anomalias de chuvas no polo de produção de grãos de Paragominas, Pará. *In*: XVIII Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 2013, Belém.

FEARNSIDE, P. M. Amazon dams and waterways: Brazil's Tapajós Basin plans. **Ambio**, v. 44, n. 5, p. 426-439, 2015.

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

HOBBIE, S. E.; GRIMM, N. B. Nature-based approaches to managing climate change impacts in cities. **Philosophical Transactions of the Royal Society B**, v. 375, n. 1794, p. 20190124, 2020.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/>. Acesso em: 15 set. 2022.

LIMA, A. F. B. *et al*. Aportes Teóricos sobre a Influência dos Fenômenos Atmosféricos na Precipitação do Estado do Acre e o Uso de Índice para Avaliação da Chuva. **UÁQUIRI-Revista do Programa de Pós Graduação em Geografia da Universidade Federal do Acre**, v. 4, n. 1, 2022.

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

MARENGO, J. A. *et al*. Mudanças climáticas e eventos extremos no Brasil. **Rio de Janeiro: FBDS**, 2009.

MELO, A. C. S.; VIEIRA, A. T. S.; CORDEIRO, B. A. F. Diagnosis of the Potential for Soybeans Outflow Through Ports in the State of Pará: A Bibliographical and Documentary Analysis. **InterSciencePlace**, v. 12, n. 3, 2017.

MORAIS, L. F. B. *et al*. Índice EI30 e sua relação com o coeficiente de chuva do sudoeste de Mato Grosso. **Revista brasileira de ciência do solo**, v. 3, pág. 339-344, 1991.

OLIVEIRA JÚNIOR, R. C.; MEDINA, B. F. A Erosividade Das Chuvas Em Manaus (AM). **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v. 14, p. 235-239, 1990.

PESSOA, F. C. L.; RODRIGUES, B. D.; FERREIRA FILHO, D. F. Análise espacial e temporal da erosividade das chuvas no estado do Pará–Brasil a partir de dados de satélite. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 31, p. 696-723, 2022.

PINTO, C. A. D. *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, 2022.

PUMO, D. *et al*. Climate change effects on the hydrological regime of small non-perennial river basins. **Science of the Total Environment**, v. 542, p. 76-92, 2016.

ROOY, M.P.V. A rainfall anomaly index independent of time and space. Notos. **Weather Bureau of South Africa**, v. 14, n. 1965, p. 43-48, 1965.

ROSA, A. G.; SOUSA, A. M. L. Erosividade da Chuva: Distribuição e Correlação com a Precipitação em Óbidos-PA (Brasil). **Revista GeoAmazônia**, v. 6, n. 11, p. 256-272, 2018.

ROSA, D. B. *et al*. A distribuição espacial das chuvas na porção centro oeste do estado de Mato Grosso-Brasil. **Revista Eletrônica da Associação dos Geógrafos Brasileiros, Seção Três Lagoas**, p. 25-25, 2007.

SALTON, J. C.; COMUNELLO, E.; FIETZ, C. R. Estimativa de índices de erosividade da chuva para o Estado de Mato Grosso. 2012.

SCHARDONG, A.; SIMONOVIC, S. P.; GARCIA, J. I. B. O possível efeito de mudanças climáticas e suas incertezas sobre afluências em sistemas de recursos hídricos. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, v. 11, n. 2, p. 53-65, 2014.

SILVA, A. M. *et al*. Rainfall erosivity map for Brazil. **CATENA**, vol. 57, issue 3, p. 251-259, 2004.

SOITO, J. L. S; FREITAS, M. A. V. Amazon and the expansion of hydropower in Brazil: Vulnerability, impacts and possibilities for adaptation to global climate change. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 6, p. 3165-3177, 2011.

SOUSA, E. S.; SANTOS, V. C.; COSTA, C. E. A. S. Influência de fenômenos climáticos sobre o regime de vazões na Bacia Hidrográfica do Rio Tapajós. **Holos environment**, v.22 (1), p.18-30 2022.

WATANABE, M. *et al*. Improved climate simulation by MIROC5: mean states, variability, and climate sensitivity. **Journal of Climate**, v. 23, n. 23, p. 6312-6335, 2010.

WISCHMEIER, W. H. A rainfall erosion index for a universal soil-loss equation. **Soil Science Society of America Journal**, v. 23, n. 3, p. 246-249, 1959.