Revista Brasileira de Climatologia
Brazilian Journal of Climatology

OPEN ACCESS

ISSN 2237-8642

DINÂMICA DA PRECIPITAÇÃO EM FLORESTAS E ÁREAS DE DESMATAMENTO DURANTE A ESTAÇÃO SECA NA AMAZÔNIA CENTRO-LESTE: UM ESTUDO DE CASO NA BACIA DO XINGU

Precipitation dynamics in forests and deforestation areas during the dry season in the Central-Eastern Amazon: a case study in the Xingu basin

Dinámica de la precipitación en bosques y áreas desforestadas durante la estación seca en la Amazonía Centro-Oriental: un estudio de caso en la cuenca del Xingu

Rodrigo Martins Moreira
Universidade Federal de Rondônia (UNIR)
rodrigo.moreira@unir.br

Bruno César dos Santos
Universidade Federal de São Carlos
bcsantos@ufscar.br

Resumo: O regime de precipitação na bacia do Xingu é um aspecto importante do clima regional da Amazônia. Neste artigo, analisamos tendências e eventos extremos de precipitação em áreas florestadas e de desmatamento da bacia do Xingu, na Amazônia oriental. Os dados estimados foram validados utilizando pluviômetros, e métodos estatísticos foram aplicados para avaliar as tendências nos padrões de precipitação e espacializar a inclinação de Sen para fornecer insights para a gestão dos recursos hídricos na região durante a estação seca. A análise emprega testes de correlação Ponto-Bisserial para avaliar a associação entre a cobertura florestal binária (1 para floresta, 0 para não floresta) e diversos índices de precipitação. Todas as estações com teste Mann-Kendall significativo apresentaram diminuição da precipitação, e a maior tendência de redução de precipitação encontrada foi de -0,43 mm por mês para a estação 151003. Os resultados da correlação RPB sugerem que a cobertura florestal está mais fortemente associada à persistência e à intensidade de períodos úmidos do que a eventos extremos isolados de precipitação, lançando luz sobre a interação entre os padrões de precipitação e a dinâmica florestal.

Palavras-chave: Mudança climática; Desmatamento; Computação em nuvem; Inclinação de Sen;

Tendências.

Abstract: The precipitation regimen in the Xingu watershed is an important aspect of the Amazon regional climate. In this paper, we analyze trends and extreme precipitation events in forested and deforested areas for the Xingu watershed, eastern Amazon. The estimated data was validated using rain gauges and statistical methods were applied to evaluate trends in precipitation patterns and spatialize the Sen's slope to provide insights for water resources management in the region for the dry season. The analysis employs Point-Biserial correlation tests to assess the association between binary forest cover (1 for forest, 0 for deforested) and various precipitation indexes. All stations with significant Mann-Kendall test showed decreasing precipitation, and the largest precipitation reduction trend found was -0.43 mm per month for station 151003. The results of the RPB correlation suggest that forest cover is more strongly associated with the persistence and intensity of wet periods than with isolated extreme precipitation events, shedding light on the interaction between precipitation patterns and forest dynamics.
Keywords: Climate change; Deforestation; Cloud Computing; Sen's Slope; Trends.

Resumen: El régimen de precipitación en la cuenca del Xingu es un aspecto importante del clima regional de la Amazonía. En este artículo, analizamos tendencias y eventos extremos de precipitación en áreas boscosas y deforestadas de la cuenca del Xingu, en la Amazonía oriental. Los datos estimados fueron validados utilizando pluviómetros, y se aplicaron métodos estadísticos para evaluar las tendencias en los patrones de precipitación y espacializar la pendiente de Sen para ofrecer información útil para la gestión de los recursos hídricos en la región durante la estación seca. El análisis emplea pruebas de correlación punto-biserial para evaluar la asociación entre la cobertura forestal binaria (1 para bosque, 0 para no bosque) y diversos índices de precipitación. Todas las estaciones con prueba de Mann-Kendall significativa presentaron disminución de la precipitación, y la mayor tendencia de reducción encontrada fue de -0,43 mm por mes para la estación 151003. Los resultados de la correlación RPB sugieren que la cobertura forestal está más fuertemente asociada con la persistencia y la intensidad de los períodos húmedos que con eventos extremos aislados de precipitación, arrojando luz sobre la interacción entre los patrones de precipitación y la dinámica forestal.
Palabras clave: Cambio climático; Deforestación; Computación en la nube; Pendiente de Sen; Tendencias.

Submetido em: 27/08/2024
Aceito para publicação em: 04/06/2025
Publicado em: 03/07/2025

1. INTRODUÇÃO

Reconhecida como a maior floresta tropical remanescente do planeta, a Amazônia também registra as maiores taxas anuais de desmatamento entre as florestas tropicais. Na parte leste da Amazônia, a bacia do Rio Xingu cobre cerca de 500.000 km², com descarga anual média de aproximadamente 8000 m^3s^{-1}, classificando-a como o quinto maior afluente da Amazônia (Dias *et al*., 2015). A precipitação desempenha um papel crucial na manutenção do ciclo hidrológico da floresta, que por sua vez suporta a rica biodiversidade da região. No entanto, as mudanças climáticas levaram a alterações nos padrões de precipitação e eventos climáticos extremos, podendo ter implicações significativas para os ecossistemas da floresta amazônica e seus habitantes (Soares-Filho *et al*., 2012; Rizzo *et al*., 2020).

A Bacia do Xingu enfrenta várias ameaças ambientais que podem impactar significativamente a biodiversidade e o ciclo hidrológico da região. O desmatamento, a mineração e a agricultura são alguns dos principais impulsionadores da degradação ambiental nesta bacia (Souza, 2020). Essas atividades podem levar à erosão do solo, perda de cobertura vegetal e poluição da água, entre outros impactos (Haghtalab *et al*., 2020). Mudanças nos padrões e tendências de precipitação podem intensificar as ameaças ambientais enfrentadas pela Bacia do Xingu. As mudanças climáticas têm levado a alterações nos padrões de precipitação na região Amazônica, com algumas áreas apresentando eventos climáticos extremos mais frequentes, como secas severas e inundações (De Sales *et al*., 2020). Isso pode agravar ainda mais o impacto do desmatamento, visto que a perda de cobertura vegetal pode reduzir a capacidade de retenção de água do solo, tornando a região mais vulnerável a secas e outros extremos climáticos (Rizzo *et al*., 2020).

Mudanças nos padrões de precipitação podem impactar os recursos hídricos, essenciais para o ecossistema e população da região do Rio Xingu (Lucas *et al*., 2021). Monitorar os extremos de precipitação é, portanto, de grande importância na bacia do Xingu e na região Amazônica. No entanto, a rede existente de pluviômetros na bacia do Xingu, uma área crítica para a biodiversidade da região, é escassa e geograficamente limitada. Portanto, produtos de precipitação obtidos por sensoriamento remoto são necessários para complementar os limitados dados de chuva, e oferecem várias vantagens em relação às medições de pluviômetros, incluindo cobertura espacial mais ampla, maior resolução temporal e custo-efetividade (Cavalcante *et al*., 2020). Diversos produtos de sensoriamento

remoto estão disponíveis para estimativa de precipitação, incluindo a Missão de Medição de Chuvas Tropicais (TRMM), Medição Global de Precipitação (GPM) e o grupo de Perigos Climáticos de Precipitação Infravermelha com dados de Estação (CHIRPS) (De Moraes Cordeiro; Blanco, 2021). Entre esses, o CHIRPS tem sido amplamente utilizado para monitoramento de precipitação e estudos climáticos, devido à sua alta precisão, disponibilidade de dados de longo prazo e resolução temporal diária (De Sales *et al*., 2020).

Neste cenário, métodos estatísticos como a Inclinação de Sen têm sido amplamente utilizados para analisar a magnitude das tendências nos padrões de precipitação, não apenas na região Amazônica, mas também em outras partes do mundo. A espacialização da Inclinação de Sen também tem sido reconhecida como uma ferramenta valiosa para a tomada de decisões na gestão de recursos hídricos, fornecendo informações importantes sobre as tendências de precipitação em uma área específica (Mu; Biggs; Shen, 2021). A utilização do estimador de inclinação de Sen em estudos de ciência climática destaca sua importância na quantificação e avaliação da magnitude da mudança na precipitação (De Moraes Cordeiro; Blanco, 2021). Este método estatístico permite que pesquisadores identifiquem tendências ascendentes e descendentes, fornecendo informações valiosas para estudos climáticos, gestão de recursos hídricos e monitoramento de ecossistemas (Cavalcante *et al*., 2020). Ao identificar e quantificar tendências, esses métodos contribuem para um melhor entendimento da dinâmica climática e auxiliam nos processos de tomada de decisão relacionados à gestão de recursos hídricos e gestão ambiental (Paca *et al*., 2020).

Juntamente com a análise de tendências, os índices de precipitação fornecem informações valiosas sobre diferentes aspectos de eventos de precipitação extrema, incluindo duração, intensidade, frequência e magnitude. Os principais índices de precipitação comumente usados nas ciências climáticas são dias consecutivos com chuva (CWD), dias consecutivos sem chuva (CDD), precipitação máxima em 1 dia (RX1), precipitação máxima em 5 dias (RX5) e o percentil 99 da precipitação diária (p99) (Cavalcante *et al*., 2020). Os índices de dias consecutivos com chuva (CWD) e dias consecutivos sem chuva (CDD) quantificam a duração dos períodos úmidos e secos, respectivamente (Lucas *et al*., 2021). Este trabalho inova ao calcular esses índices utilizando o poder de processamento do *Google Earth Engine*, explorando o potencial da plataforma de computação em nuvem gratuita e com petabytes de dados.

No presente trabalho, apresentamos uma análise espaço-temporal dos padrões de precipitação na bacia do Xingu, utilizando dados de sensoriamento remoto do CHIRPS. Aplicamos métodos estatísticos para avaliar as tendências nos padrões de precipitação e espacializamos a Inclinação de Sen para fornecer *insights* para a gestão dos recursos hídricos na região. O estudo destaca a importância do sensoriamento remoto para o monitoramento da precipitação em áreas com dados limitados de chuva e oferece informações valiosas para a tomada de decisões na gestão dos recursos hídricos na bacia do Xingu.

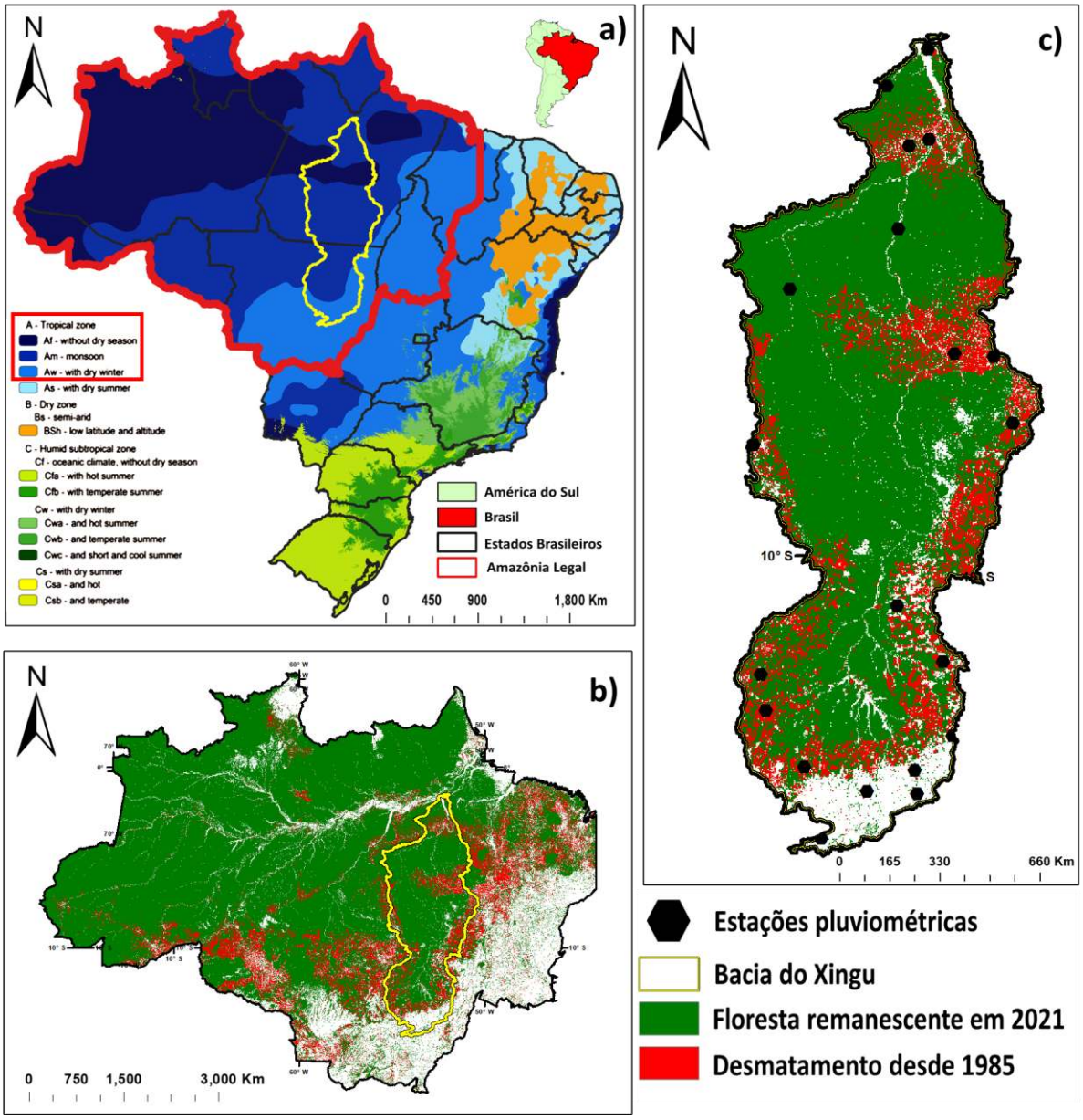
2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Área de estudo

A bacia hidrográfica do Xingu é uma significativa bacia fluvial localizada no Brasil, cobrindo uma vasta área na floresta Amazônica. É caracterizada por uma diversidade de ecossistemas, incluindo florestas, savanas e áreas úmidas.

A referida bacia apresenta clima tropical, conforme indicado pelo sistema de classificação climática Köppen-Geiger, como mostrado na Figura 1. A maior parte da Bacia do Xingu está sob o tipo climático Af, que representa um clima tropical quente e úmido sem estação seca. Essa classificação está de acordo com o clima geral da região da floresta Amazônica, caracterizado por temperaturas altas e chuvas abundantes durante todo o ano.

Figura 1 - Localização da área de estudo (em amarelo): a) Classificação climática de Köppen; b) Desmatamento na Amazônia Legal desde 1985; c) Localização de pluviômetros selecionados na bacia do Xingu.



Fonte: MapBiomas (2021) e Alvares (2013).

2.2 Dados de precipitação CHIRPS

Para obter dados de precipitação, foi utilizado o conjunto de dados CHIRPS (*Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data*) (Funk *et al*., 2015). O CHIRPS combina estimativas de precipitação baseadas em satélite com observações de pluviômetros terrestres. Essa abordagem supera as limitações de cada fonte de dados quando usadas independentemente, aproveitando as respectivas forças. As estimativas baseadas em satélite

preenchem lacunas de dados onde os pluviômetros são escassos ou inexistentes, enquanto os pluviômetros fornecem dados de estações de superfície para aumentar a precisão das estimativas baseadas em satélite. Como resultado, o CHIRPS produz dados de precipitação de alta qualidade e alta resolução, com uma resolução de 0,05°. Este conjunto de dados tem diversas aplicações, incluindo monitoramento de secas e previsão de inundações. A metodologia empregada no CHIRPS é descrita em detalhes em Funk *et al*. (2015), e sua confiabilidade foi amplamente testada e validada em várias regiões do mundo.

Para analisar dados históricos de precipitação na bacia do Xingu, foi utilizado índices de chuvas e ferramentas de análise de tendências de chuvas. Esses métodos foram aplicados em uma escala pixel a pixel. Os dados do CHIRPS foram processados em escala diária para o período da estação seca, abrangendo os meses de maio a outubro. A validação dos dados do CHIRPS para a região de estudo pode ser encontrada no material suplementar.

2.3. Cálculo de índices de precipitação no GEE

CWD representa o número máximo de dias consecutivos com precipitação acima de um limite especificado (por exemplo, 0,1 mm). Um algoritmo foi desenvolvido para percorrer o conjunto de dados e contar o número de dias consecutivos com precipitação acima do limite. A contagem máxima de dias úmidos consecutivos foi registrada como CWD. A função para calcular esse índice no GEE foi identificando os valores acima de zero em cada imagem na coleção de imagens - ImageCollection.gt(0) - sobre a coleção de imagens diárias CHIRPS.

CDD refere-se ao número máximo de dias consecutivos com precipitação abaixo de um limite especificado (por exemplo, 0,1 mm). De maneira semelhante ao cálculo do CWD, o algoritmo contou o número de dias consecutivos com precipitação abaixo do limite, e a contagem máxima foi registrada como CDD. A função para calcular esse índice no GEE foi identificar os valores iguais a zero em cada imagem na coleção de imagens - ImageCollection.eq(0) - sobre a coleção de imagens diárias CHIRPS.

RX1 representa a quantidade máxima de precipitação registrada em um único dia durante o período de análise. O algoritmo identificou o valor mais alto dos dados diários de precipitação e o atribuiu como RX1. A função para calcular esse índice no GEE foi ImageCollection.max() sobre a coleção de imagens diárias CHIRPS.

RX5 representa a precipitação acumulada máxima em quaisquer 5 dias consecutivos durante o período de análise. Uma janela móvel de 5 dias foi aplicada ao conjunto de dados, e a precipitação total dentro de cada janela foi calculada. O valor máximo obtido das janelas de 5 dias foi atribuído como RX5. A função para calcular esse índice no GEE foi ImageCollection.max() sobre a coleção de imagens CHIRPS Pentad.

O p99 representa o valor de precipitação abaixo do qual 99% dos dados diários de precipitação se encontram. O algoritmo ordenou os valores diários de precipitação em ordem crescente e identificou o valor no 99º percentil. Esse valor foi atribuído como p99. A função para calcular esse índice no GEE é realizada passando ee.Reducer.percentile(99) sobre a série temporal da coleção de imagens.

2.4. Análise da Inclinação de Sen

Uma vez identificadas as tendências significativas, é importante estimar a magnitude dessa tendência. Para o teste, foi utilizada a escala temporal anual. Nos diversos métodos aplicados para esse fim, a normalidade do conjunto de dados é um pré-requisito, sendo altamente sensível a valores discrepantes. Para superar esse fator limitante, é necessário aplicar um teste mais robusto adaptado a dados não paramétricos, como a Inclinação de Sen (SS), destinado a identificar magnitudes em tendências de séries temporais (Equação (1)).

$$SS = Median\left\{\left[\left(\frac{x_i - x_j}{i-j}\right)_{j=1}^{j=n-1}\right]_{i=j+1}^{i=n}\right\}$$

onde xi e xj são pares em tempos dados i e j (j > i), respectivamente.

A inclinação de Sen foi calculada em uma escala de tempo de soma de precipitação mensal usando ee.Reducer.sensSlope().

2.5. Correlação ponto-bisserial

A correlação ponto-bisserial, frequentemente denotada como RPB, é uma medida estatística usada para avaliar a força e a direção da relação entre uma variável binária (neste estudo, floresta e não floresta) e uma variável contínua. É uma forma especializada de correlação que quantifica a associação entre esses dois tipos de variáveis.

O coeficiente de correlação ponto-bisserial varia dentro do intervalo de -1 a 1, com valores negativos indicando uma relação negativa, valores positivos indicando uma relação positiva e zero indicando a ausência de relação.

A fórmula para calcular a correlação ponto-bisserial é a seguinte (Equação 2):

$$r_{pb} = \frac{M_0 - M_1}{s_y} \sqrt{\frac{n_0 \cdot n_1}{n^2}}$$

Onde:

M_1 é a média da variável contínua para o grupo com valor de 1 (floresta).

M_0 é a média da variável contínua para o grupo com valor de 0 (não floresta).

s é o desvio padrão da variável contínua para toda a amostra.

n_1 é o tamanho da amostra do grupo com valor de 1.

n_0 é o tamanho da amostra do grupo com valor de 0.

N é o tamanho total da amostra.

A interpretação do coeficiente de correlação ponto-bisserial depende de sua magnitude (Tate, 1954):

Uma correlação ponto-bisserial positiva ($r_{pb}>0$) indica que, à medida que a variável binária aumenta (por exemplo, de 0 para 1), a variável contínua tende a aumentar também.

Uma correlação ponto-bisserial negativa ($r_{pb}<0$) indica que, à medida que a variável binária aumenta, a variável contínua tende a diminuir.

Uma correlação ponto-bisserial de 0 ($r_{pb}=0$) sugere que não há relação linear entre as variáveis binária e contínua.

3. RESULTADOS

3.1. Análise da estação seca

A Tabela 1 a seguir resume os valores de tendência da precipitação na estação seca entre as estações na bacia do Xingu. Entre as estações, cerca de 63,6% mostram que não há mudança nas tendências de precipitação, e cerca de 36,3% indicam uma tendência de diminuição para o período seco na bacia do Xingu. Assim, o padrão de chuvas durante o período seco é mantido na maioria das estações. No entanto, algumas estão mostrando um

padrão de redução, o que pode prolongar o período seco nesses locais dentro da bacia hidrográfica do Xingu.

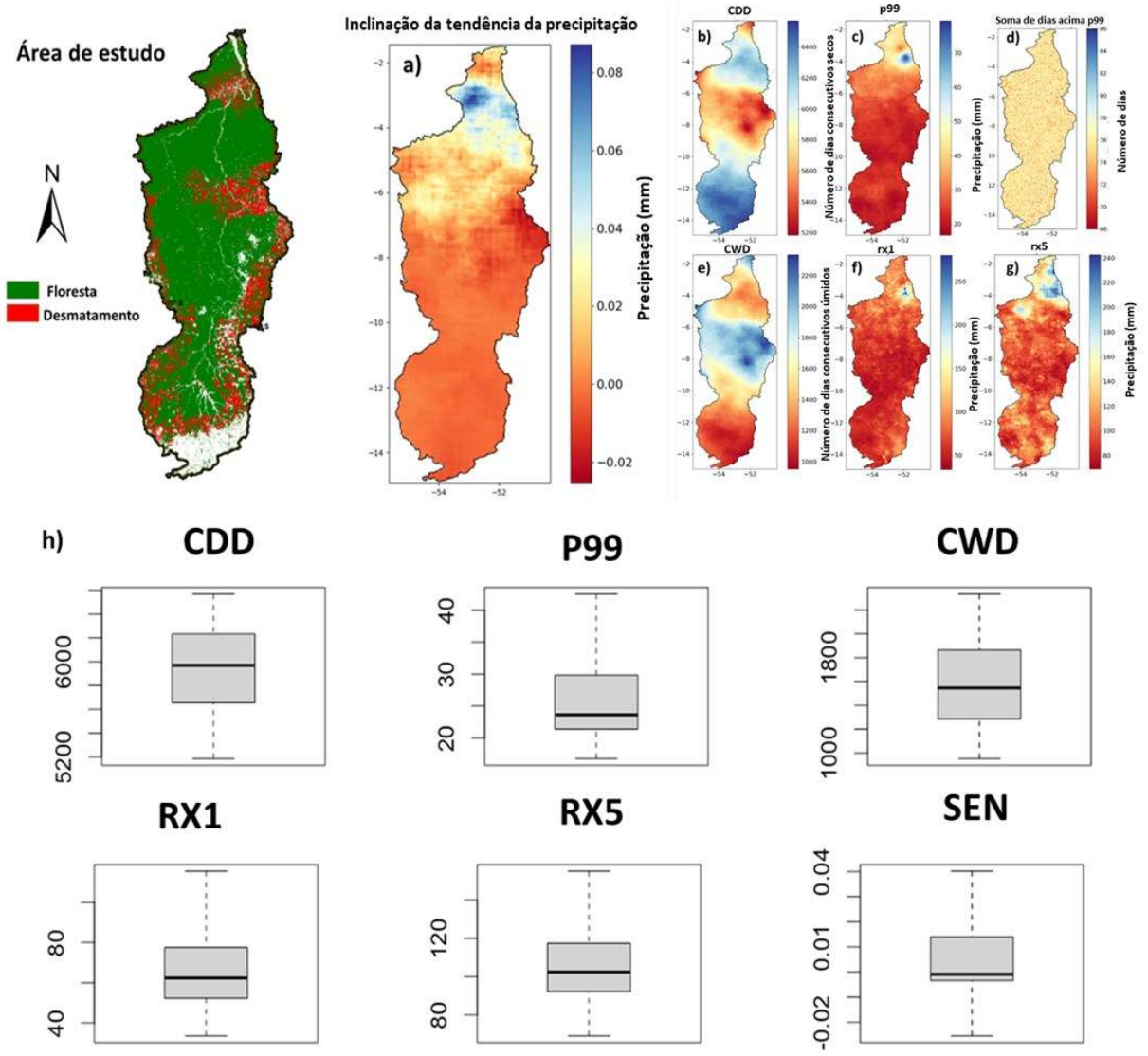
Tabela 1 - Tendência da precipitação na estação seca por meio de Mann-Kendall (MK) entre estações selecionadas.

Código do Pluviômetro	Tendência MK na estação seca	Valor-p do MK para a estação seca	Inclinação Sen's Slope da estação seca
151003	diminuindo	0.000	-0.429
152001	sem tendência	0.296	0.096
252001	diminuindo	0.012	-0.164
351002	sem tendência	0.807	0.012
352001	sem tendência	0.092	0.087
352005	sem tendência	0.633	-0.027
452000	sem tendência	0.935	-0.003
554000	diminuindo	0.013	-0.125
651001	sem tendência	0.725	-0.015
651002	sem tendência	0.947	-0.001
750000	diminuindo	0.002	-0.184
855000	sem tendência	0.259	0.007
1052000	sem tendência	0.685	0.000
1152000	sem tendência	0.838	0.000
1154001	sem tendência	0.062	0.000
1251001	sem tendência	0.193	0.000
1255002	sem tendência	0.202	0.000
1352000	diminuindo	0.001	0.000
1352001	diminuindo	0.007	0.000
1353001	diminuindo	0.000	-0.044
1354000	sem tendência	0.623	0.000
1453000	diminuindo	0.035	0.000

Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

A Figura 2 apresenta as tendências diárias de precipitação durante o período seco na bacia do Xingu, com base em diferentes índices (CDD, CWD, RX1, RX5, P99) e na Inclinação de Sen. Na Figura 2a, observa-se um leve aumento nas precipitações na porção norte da bacia. Em contraste, a região leste mostra uma leve tendência de redução nos volumes de chuva. De forma geral, a maior parte da bacia do Xingu mantém um padrão de tendência considerado usual para o período seco, sem alterações significativas.

Figura 2 – Mapa da tendência de chuvas (estação seca) dos índices de precipitação aplicados na área de estudo: a) Valor da precipitação (mm); b) Dias consecutivos sem chuva; c) Valor da precipitação (mm) acima de 99%; d) Soma dos dias com valor de precipitação acima de 99%; e) Dias consecutivos sem chuva; f) Valor máximo (mm) de precipitação em um dia; g) Valor máximo (mm) de precipitação em cinco dias; h) Boxplot dos índices da estação seca.



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Entre dias secos consecutivos (Figura 2b) e dias úmidos (Figura 2e), um padrão oposto foi observado na bacia do Xingu. Nas regiões norte e sul da bacia, os dias secos (CDD) aumentaram, enquanto os dias úmidos (CWD) diminuíram. Na parte central, um padrão oposto foi observado, com uma diminuição na seca (CDD) para a frequência de dias úmidos (CWD) nesta região da bacia. O número de dias secos consecutivos está aumentando nessas áreas (norte e sul) e, portanto, resultando em uma menor frequência de dias úmidos nesta região da bacia. Na parte central da bacia, um padrão diferente foi observado, com uma

redução no CDD e um aumento no CWD. Isso indica que essa parte da bacia apresenta mais dias úmidos do que secos durante o período seco, especialmente na região centro-leste, onde as tendências apontam para um aumento mais significativo na bacia.

Quanto às tendências do maior volume de chuva em um único dia (Figura 2f), houve uma redução considerável para quase toda a bacia, com exceção de uma pequena área ao norte que mostrou um aumento. Já em relação às tendências de precipitação acumulada em cinco dias (Figura 2g), toda a região da bacia registrou uma redução geral, mas com um padrão de aumento na precipitação acumulada em cinco dias na porção nordeste da bacia.

Por fim, as tendências de chuvas extremas (volumes 99% acima da média) apresentaram uma redução geral no volume (Figura 2c) para quase toda a bacia, principalmente na parte centro-sul. No entanto, a parte norte mostrou um aumento no volume de chuvas extremas em uma área isolada ao nordeste da bacia. Quanto ao número de dias de chuva extrema (Figura 2d), em média, a bacia registra cerca de 76 dias de chuva com volumes acima de 99% em relação à média durante o período úmido.

A Figura 2h, na parte inferior da imagem, mostra a variação nos valores de precipitação (mm ou dias) no período seco entre os índices de chuva e a tendência de precipitação. Quanto aos índices CDD e CWD, os resultados mostram um número médio de dias de aproximadamente 5.900 para dias secos consecutivos e aproximadamente 1.500 para dias úmidos consecutivos. O intervalo de dias mostrou uma variação de dias secos consecutivos (de 5.200 a 6.500 dias) maior que a variação de dias úmidos consecutivos (de 900 a 2.300 dias). Para os índices RX1 e RX5, os resultados apresentam um volume médio de precipitação de aproximadamente 60 mm, acumulados em um dia, e aproximadamente 100 mm, acumulados em cinco dias. A amplitude em milímetros variou de 30 a 110 mm para o dia RX1 e de 70 a 170 mm para os dias RX5. Os resultados do índice P99 mostram um volume médio de precipitação extrema de 24 mm e uma amplitude entre 17 e 42 mm. Por fim, a tendência de precipitação no período seco não mostrou alteração média (0,00) e na amplitude houve momentos de tendências com uma leve redução (-0,03) e um leve aumento (0,04) de chuva.

3.2. Correlação ponto-bisserial para áreas de floresta e não floresta

A análise de correlação ponto-bisserial revelou associações estatisticamente significativas entre diversas variáveis climáticas e a presença de cobertura florestal (Tabela 2).

Tabela 3 - Valores para a análise ponto-bisserial.

Índices	Correlação	p-valor
CDD	-0.146	0.000
CWD	0.149	0.000
acima_p99	-0.029	0.004
precipitação_p99	0.152	0.000
RX1	-0.018	0.071
RX5	-0.159	0.000

Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

Entre os resultados mais relevantes, a variável RX5 apresentou a correlação mais forte com a cobertura florestal (r = -0,159; p < 0,001). Essa associação negativa sugere que áreas com cobertura florestal tendem a registrar menores volumes de precipitação extrema em curto período, quando comparadas a áreas não florestadas. De forma semelhante, a variável CDD também apresentou correlação negativa com a cobertura florestal (r = -0,146; p < 0,001), indicando que regiões sujeitas a longos períodos de seca são menos propensas a manter florestas. Esses achados reforçam a hipótese de que áreas florestadas exercem papel amortecedor frente a extremos hidrológicos, possivelmente devido à sua influência sobre o microclima e a retenção de umidade no solo.

Por outro lado, as variáveis CWD e precipitation_p99 apresentaram correlações positivas com a cobertura florestal (r = 0,149 e r = 0,152, respectivamente; p < 0,001). Esses resultados indicam que áreas florestadas tendem a ocorrer em regiões com períodos úmidos mais prolongados e com maior intensidade de eventos extremos de precipitação, o que está de acordo com teorias ecológicas que associam a persistência das florestas à disponibilidade contínua de umidade e a regimes hidrológicos favoráveis.

A variável acima_p99, que representa a frequência de eventos de precipitação extremamente elevada, apresentou correlação negativa muito fraca, embora estatisticamente significativa, com a cobertura florestal (r = -0,029; p = 0,004). Já a variável RX1 exibiu correlação negativa ainda mais fraca (r = -0,018), sem significância estatística (p = 0,071), sugerindo pouca ou nenhuma associação entre eventos extremos de curta duração e

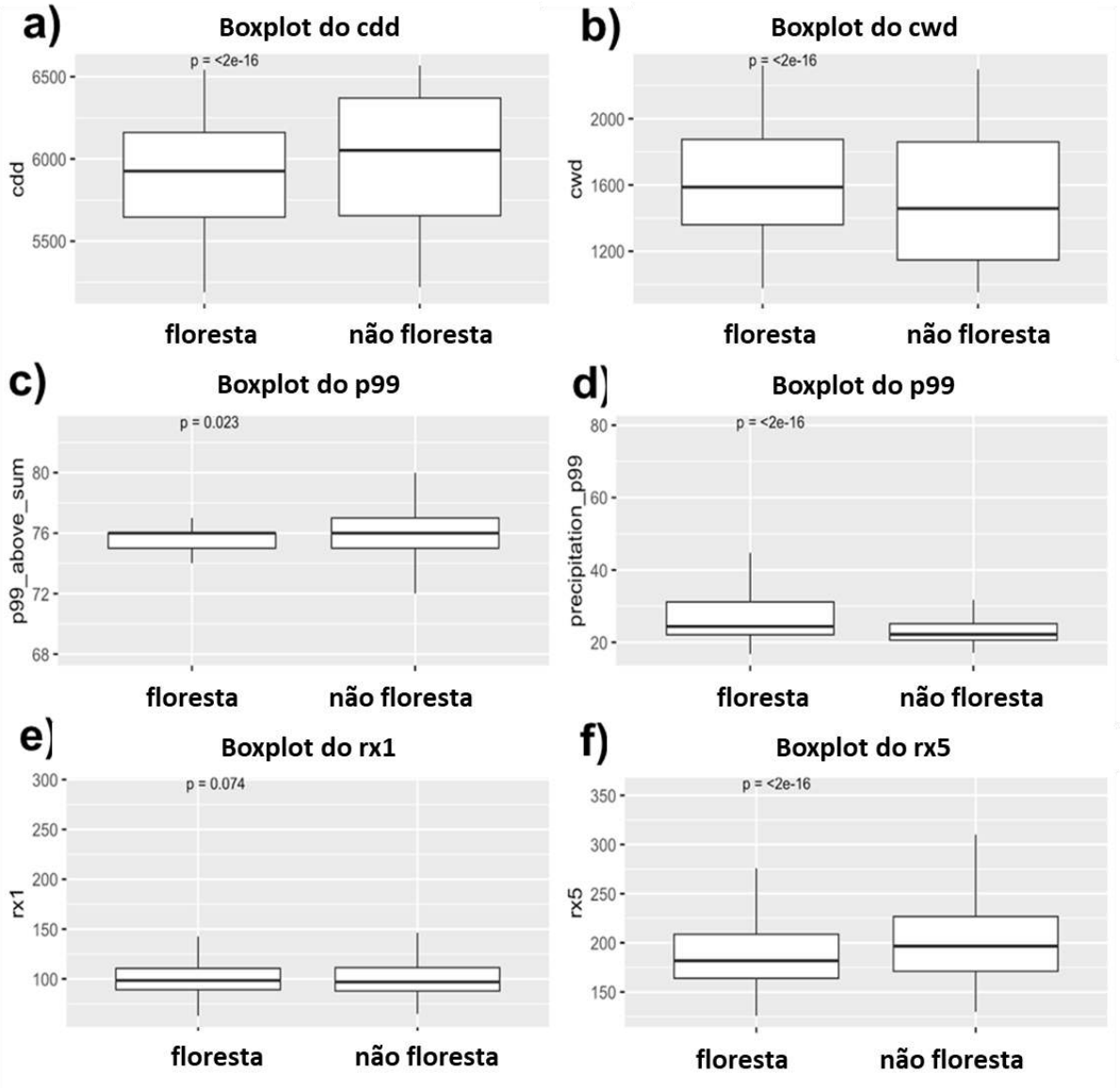
a presença de cobertura florestal. Em conjunto, esses resultados indicam que, embora a cobertura florestal apresente correlações fracas, mas significativas, com alguns extremos hidrometeorológicos, essas relações são geralmente de baixa magnitude.

Os resultados sugerem que a cobertura florestal está mais fortemente associada à persistência e à intensidade de períodos úmidos do que a eventos extremos isolados de precipitação. As correlações moderadas, porém, significativas, ressaltam a importância de se considerar a estrutura temporal das chuvas, como a frequência de dias secos ou úmidos consecutivos, na análise das condições climáticas que favorecem ou comprometem a manutenção da vegetação florestal. Esses achados podem contribuir para o planejamento territorial e a modelagem de serviços ecossistêmicos em regiões onde a dinâmica florestal é sensível à variabilidade hidrológica.

3.2. Estação seca

A Figura 3 abaixo mostra a variação nos valores de precipitação (mm ou dias) no período seco entre os índices de chuva separados em áreas florestadas e áreas de desmatamento.

Figura 3 – Gráfico de caixa dos valores de índice (CDD, CWD, P99, RX1 e RX5) da precipitação diária (estação seca) para áreas florestais e de desmatamento.



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Com relação aos índices de CDD (Fig. 3a), os resultados mostram um número médio ligeiramente menor de dias secos consecutivos em áreas florestadas comparadas às áreas de desmatamento. Em relação à amplitude dos dias secos consecutivos, as áreas florestais e não florestais apresentam certa semelhança, porém com uma variação na amplitude média maior nas áreas sem floresta.

Para o índice CWD (Fig. 3b), os resultados mostram um número médio ligeiramente maior de dias consecutivos de chuva em áreas florestadas em comparação com áreas de desmatamento. Em relação ao intervalo de dias consecutivos de chuva, observou-se um

intervalo ligeiramente maior de valores diários para áreas florestadas em comparação com áreas de desmatamento, que apresentaram um intervalo menor de dias.

Para o máximo acumulado em um dia (RX1), os resultados apresentados na Figura 3e mostram um volume médio de precipitação e amplitude (máximo e mínimo) similares em áreas florestadas e de desmatamento. Para o máximo acumulado em cinco dias (RX5), os resultados na Figura 3f indicam um volume médio de precipitação ligeiramente menor em áreas florestadas e um volume médio ligeiramente maior em áreas de desmatamento. A amplitude dos valores (máximo e mínimo) mostrou um comportamento superior dos valores máximos em áreas sem floresta comparado às áreas com floresta, que apresentaram amplitudes menores.

Finalmente, os resultados para os índices (P99) de precipitação extrema (volume e dias) mostram na Figura 3c uma média similar de dias extremos para ambos os tipos de uso do solo, porém com uma amplitude maior em áreas sem floresta. Para os volumes médios de precipitação extrema (Figura 3d), as áreas florestadas apresentam um valor médio ligeiramente superior em comparação com as áreas de desmatamento, que exibiram um valor médio ligeiramente inferior. Em termos de amplitude do volume extremo de precipitação, as áreas florestais possuem uma amplitude máxima maior do que as áreas não florestais.

Em geral, a vegetação florestal tem a capacidade de influenciar a precipitação diária, como a redução média de dias secos consecutivos, o aumento médio de dias úmidos consecutivos, a redução média no volume de chuva acumulado em cinco dias e, por fim, o aumento médio do volume extremo e redução na amplitude de dias de chuva extrema, especialmente no período seco. Por outro lado, a área sem vegetação florestal contribui, principalmente no período seco, para o aumento médio no número de dias consecutivos de seca, redução de dias úmidos consecutivos, aumento médio no volume e na amplitude máxima de precipitação acumulada em cinco dias e, finalmente, um aumento na amplitude do número de dias extremos e uma redução no volume extremo de precipitação.

4. DISCUSSÃO

O regime de precipitação na bacia do Xingu é um aspecto importante do clima regional e tem implicações significativas para o ciclo hidrológico e a dinâmica do ecossistema na área. Vários fatores influenciam os padrões de precipitação nesta bacia, incluindo a localização

geográfica, a topografia, os padrões de circulação atmosférica e a cobertura do solo (Rizzo *et al*., 2020).

A presença de cadeias montanhosas, como a Serra do Cachimbo, pode provocar efeitos orográficos, levando a um aumento das chuvas nas encostas voltadas para o vento e a áreas de sombra de chuva no lado de sotavento. A interação entre os ventos predominantes e a topografia contribui para a formação de sistemas convectivos localizados, que podem resultar em eventos de chuva intensa em certas áreas (Wang *et al*., 2018).

Os padrões de circulação atmosférica também têm um impacto significativo no regime de precipitação na bacia do Xingu. A região é influenciada pela Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), uma característica proeminente da circulação atmosférica na América do Sul. A ZCAS está associada à convergência de massas de ar úmidas provenientes da bacia Amazônica e do Oceano Atlântico, levando à formação de sistemas convectivos e ao aumento da precipitação na bacia do Xingu (Sulca; Rocha, 2021; Towner *et al*., 2021).

O desmatamento é impulsionado por uma combinação de fatores na bacia do Xingu, incluindo expansão agrícola, exploração madeireira, desenvolvimento de infraestrutura e especulação de terras. A expansão da agricultura frequentemente envolve o desmatamento de grandes áreas de floresta, levando a mudanças na cobertura do solo e impactos subsequentes no clima regional. Mudanças na cobertura do solo, particularmente o desmatamento e práticas de uso da terra, podem afetar os padrões de precipitação na bacia do Xingu (Rizzo *et al*., 2020).

O desmatamento reduz a evapotranspiração e altera a rugosidade da superfície, levando a mudanças nos padrões de reciclagem de umidade local e circulação atmosférica. Haghtalab *et al*. (2020) descobriram que áreas desmatadas na bacia Amazônica experienciam uma redução nas chuvas comparadas às áreas florestadas, indicando a importância de preservar a floresta Amazônica para manter o regime de precipitações regional, especialmente na região de Tocantins (Haghtalab *et al*., 2020).

O desmatamento pode resultar em alterações nas propriedades da superfície terrestre, influenciando os padrões de precipitação na bacia do Xingu. Um aspecto importante é a mudança no albedo, que se refere à quantidade de radiação solar refletida pela superfície da Terra. O desmatamento leva a uma diminuição do albedo, pois as florestas possuem uma refletividade maior em comparação com a terra desmatada. Essa diminuição no albedo pode

resultar em um aumento da absorção da radiação solar, levando a temperaturas superficiais mais altas e potencialmente alterando os padrões de circulação atmosférica local.

O desmatamento também afeta a rugosidade ou aspereza da superfície da terra. As florestas tipicamente têm uma estrutura complexa com um dossel denso, que cria resistência ao fluxo de vento. Quando as florestas são derrubadas, a superfície torna-se mais lisa, reduzindo a rugosidade. Essa mudança na aspereza pode impactar a mistura vertical das massas de ar, afetando a formação de nuvens e os processos de precipitação.

Outro fator importante influenciado pelo desmatamento é a evapotranspiração, que é o processo combinado de evaporação da água da superfície e transpiração pelas plantas. As florestas têm altas taxas de evapotranspiração devido à abundância de vegetação e disponibilidade de umidade. Quando ocorre o desmatamento, a evapotranspiração é reduzida, levando a mudanças no reciclo local de umidade e na disponibilidade de umidade para a formação de nuvens e precipitação (De Sales *et al*., 2020).

5. CONCLUSÃO

A bacia do Xingu tem passado por uma transformação em sua área florestal devido ao avanço do desmatamento em algumas regiões nas últimas décadas. Essas mudanças podem afetar o regime de chuvas, aumentando eventos extremos ao longo da bacia durante sua sazonalidade climática.

Quanto às tendências das chuvas na bacia do Xingu, algumas alterações foram observadas no regime de chuvas (milímetros e número de dias) durante a estação seca. Por outro lado, as tendências durante o período seco indicaram cerca de 63,6% das estações pluviométricas apresentando neutralidade e 36,3% das estações pluviométricas estudadas demonstrando redução das chuvas. Todas as tendências estatisticamente significativas apresentaram tendência de redução da precipitação.

Espacialmente, as tendências nos índices de chuva (CDD, CWD, RX1, RX5 e p99) mudaram em algumas regiões da área de estudo. Para o período seco, os dias consecutivos sem chuva aumentaram na porção norte-sul e, para os dias consecutivos com chuva, na parte central da bacia. O máximo acumulado em um e cinco dias mostra um aumento na porção sudeste e chuvas extremas na porção nordeste.

Diante desse cenário, as áreas desmatadas dentro da bacia podem vivenciar um aumento em eventos mais extremos em termos de volume (mm) de chuva e uma seca mais prolongada durante a estação seca. Por outro lado, regiões florestais podem contribuir para a redução de volumes mais extremos de chuva com um aumento nos dias consecutivamente mais úmidos.

AGRADECIMENTOS

O autor R.M.M. gostaria de agradecer à Pró-Reitoria de Pós-Graduação e Pesquisa da Universidade Federal de Rondônia pelo apoio financeiro por meio do Edital 004/2024/DPESQ/PROPESQ/UNIR.

REFERENCIAS

ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, 711–728. 2013. https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507

CAVALCANTE, R. B. L. et al. Evaluation of extreme rainfall indices from CHIRPS precipitation estimates over the Brazilian Amazonia. **Atmospheric Research**, v. 238, p. 104879, 2020.

DE MORAES CORDEIRO, A. L.; BLANCO, C. J. C. Assessment of satellite products for filling rainfall data gaps in the Amazon region. **Natural Resource Modeling**, [s. l.], v. 34, n. 2, p. e12298, 2021.

DE SALES, F. et al. Impacts of Protected Area Deforestation on Dry-Season Regional Climate in the Brazilian Amazon. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, [s. l.], v. 125, n. 16, p. e2020JD033048, 2020.

DIAS, L. C. P. et al. Effects of land cover change on evapotranspiration and streamflow of small catchments in the Upper Xingu River Basin, Central Brazil. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, [s. l.], v. 4, p. 108–122, 2015.

FUNK, C. et al. The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes**. Scientific Data**, [s. l.], v. 2, n. 1, p. 150066, 2015.

HAGHTALAB, N. et al. Evaluating spatial patterns in precipitation trends across the Amazon basin driven by land cover and global scale forcings. **Theoretical and Applied Climatology**, [s. l.], v. 140, n. 1, p. 411–427, 2020.

LUCAS, E. W. M. et al. Trends in climate extreme indices assessed in the Xingu river basin - Brazilian Amazon. **Weather and Climate Extremes**, [s. l.], v. 31, p. 100306, 2021.

MAPBIOMAS BRASIL. **Coleção 7.1 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso de Solo do Brasil**. Disponível online: https://mapbiomas.org/colecoes-mapbiomas-1?cama_set_language=pt-BR. Acessado em 19/03/2023.

MU, Y.; BIGGS, T.; SHEN, S. S. P. Satellite-based precipitation estimates using a dense rain gauge network over the Southwestern Brazilian Amazon: Implication for identifying trends in dry season rainfall. **Atmospheric Research**, [s. l.], v. 261, p. 105741, 2021.

PACA, V. H. M. et al. Variability of trends in precipitation across the Amazon River basin determined from the CHIRPS precipitation product and from station records. **Water**, v. 12, n. 5, p. 1244, 2020.

RIZZO, R. et al. Land use changes in Southeastern Amazon and trends in rainfall and water yield of the Xingu River during 1976–2015. **Climatic Change**, [s. l.], v. 162, n. 3, p. 1419–1436, 2020.

SOARES-FILHO, B. et al. Forest fragmentation, climate change and understory fire regimes on the Amazonian landscapes of the Xingu headwaters. **Landscape Ecology**, [s. l.], v. 27, n. 4, p. 585–598, 2012.

DE SOUZA, M. B. et al. Dinâmica de uso e cobertura da terra no município de São Félix do Xingu, Estado do Pará, Brasil. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 10, p. e4889108791-e4889108791, 2020.

SULCA, J. C.; ROCHA, R. P. da. Influence of the Coupling South Atlantic Convergence Zone-El Niño-Southern Oscillation (SACZ-ENSO) on the Projected Precipitation Changes over the Central Andes. **Climate**, [s. l.], v. 9, n. 5, p. 77, 2021.

TATE, Robert F. Correlation between a discrete and a continuous variable. Point-biserial correlation. **The Annals of mathematical statistics**, v. 25, n. 3, p. 603-607, 1954.

TOWNER, J. et al. Influence of ENSO and tropical Atlantic climate variability on flood characteristics in the Amazon basin. **Hydrology and Earth System Sciences**, [s. l.], v. 25, n. 7, p. 3875–3895, 2021.

WANG, C. et al. Integrated Effects of Land Use and Topography on Streamflow Response to Precipitation in an Agriculture-Forest Dominated Northern Watershed. **Water**, [s. l.], v. 10, n. 5, p. 633, 2018.