

ANÁLISE DO PAPEL DA ZCIT NA VARIABILIDADE PLUVIOMÉTRICA DO ESTADO DO AMAZONAS

ANALYSIS OF THE ROLE OF THE ITCZ IN THE RAINFALL VARIABILITY OF THE STATE OF AMAZONAS

ANÁLISIS DEL PAPEL DE LA ZCIT EN LA VARIABILIDAD PLUVIOMÉTRICA DEL ESTADO DE AMAZONAS

Gabriel Vinicius Barros Lima

Mestrando em Geografia, Universidade Federal do Amazonas (UFAM), Manaus - AM

E-mail: gvbl.geo18@uea.edu.br, <https://orcid.org/0000-0003-4771-4142>

Jaci Maria Bilhalva Saraiva

Doutora em Meteorologia, Professora Associada da Universidade Federal do Amazonas (UFAM), Manaus -AM

E-mail: jaci.saraiva@furg.br, <https://orcid.org/0000-0002-0720-508X>

RESUMO: Este estudo analisa o papel da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) na variabilidade pluviométrica do estado do Amazonas, com o objetivo de identificar padrões sazonais de precipitação e validar dados de satélite (TRMM) mediante comparação com observações terrestres (INMET). Utilizou-se a Teoria Geossistêmica para uma abordagem integrada dos fatores climáticos e geográficos. Dados mensais de 11 estações do INMET (2002–2019) e estimativas do TRMM foram correlacionados via coeficiente de Pearson, visando avaliar a precisão do satélite. Os resultados indicaram uma correlação forte ($r = 0,801$) entre os conjuntos de dados, confirmando a confiabilidade do TRMM para análises regionais. Contudo, diferenças locais foram observadas: em Benjamin Constant ($R = 0,727$), a complexidade topográfica e microclimas reduziram a precisão, enquanto Itacoatiara ($R = 0,893$), com terreno homogêneo, apresentou maior concordância. A precipitação mostrou sazonalidade marcante, com picos entre fevereiro e maio, influenciados pela migração da ZCIT. Estações ao norte tiveram menor variabilidade devido à atuação contínua da ZCIT, enquanto áreas ao sul registraram quedas abruptas na estação seca, associadas ao deslocamento sazonal do sistema. Conclui-se que a ZCIT é central na modulação pluviométrica, mas fatores locais amplificam contrastes. O TRMM mostrou-se eficaz em áreas homogêneas, porém limitado em regiões complexas. Destaca-se a necessidade de integrar dados satelitais e terrestres para aprimorar o monitoramento climático e subsidiar políticas públicas, especialmente frente a eventos extremos e mudanças climáticas.

Palavras-chave: ZCIT, precipitação, Amazônia.

ABSTRACT: This study examines the role of the Intertropical Convergence Zone (ITCZ) in the rainfall variability of the state of Amazonas, aiming to identify seasonal precipitation patterns and validate satellite data (TRMM) by comparing it with ground-based observations (INMET). The Geosystem Theory was employed to provide an integrated approach to climatic and geographic factors. Monthly data from 11 INMET stations (2002–2019) and TRMM estimates were correlated using Pearson's coefficient to assess the satellite's accuracy. The results indicated a strong correlation ($r = 0.801$) between the datasets, confirming the reliability of TRMM for regional analyses. However, local differences were observed: in Benjamin Constant ($R = 0.727$), topographic complexity and microclimates reduced accuracy, while Itacoatiara ($R = 0.893$), with homogeneous terrain, showed greater agreement. Precipitation exhibited marked seasonality, with peaks between February and May, influenced by the migration of the ITCZ. Northern stations displayed lower variability due to the continuous influence of the ITCZ, while southern areas recorded abrupt declines during the dry season, associated with the seasonal displacement of the system. It is concluded that the ITCZ plays a central role in modulating rainfall, but local factors amplify contrasts. TRMM proved effective in homogeneous areas but was limited in complex regions. The study highlights the need to integrate satellite and ground-based data to enhance climate monitoring and support public policies, especially in the face of extreme events and climate change.

Keywords: ITCZ, Precipitation, Amazon.

RESUMEN: Este estudio analiza el papel de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) en la variabilidad pluviométrica del estado de Amazonas, con el objetivo de identificar patrones estacionales de precipitación y validar datos satelitales (TRMM) mediante la comparación con observaciones terrestres (INMET). Se utilizó la Teoría Geosistémica para un enfoque integrado de los factores climáticos y geográficos. Los datos mensuales de 11 estaciones del INMET (2002–2019) y las estimaciones del TRMM se correlacionaron mediante el coeficiente de Pearson, con el fin de evaluar la precisión del satélite. Los resultados indicaron una correlación fuerte ($r = 0,801$) entre los conjuntos de datos, confirmando la confiabilidad del TRMM para análisis regionales. Sin embargo, se observaron diferencias locales: en Benjamin Constant ($R = 0,727$), la complejidad topográfica y los microclimas redujeron la precisión, mientras que en Itacoatiara ($R = 0,893$), con terreno homogéneo, se presentó una mayor concordancia. La precipitación mostró una estacionalidad marcada, con picos entre febrero y mayo, influenciados por la migración de la ZCIT. Las estaciones al norte presentaron menor variabilidad debido a la actuación continua de la ZCIT, mientras que las áreas al sur registraron caídas abruptas en la estación seca, asociadas al desplazamiento estacional del sistema. Se concluye que la ZCIT es central en la modulación pluviométrica, pero los factores locales amplifican los contrastes. El TRMM demostró ser eficaz en áreas homogéneas, aunque limitado en regiones complejas. Se destaca la necesidad de integrar datos satelitales y terrestres para mejorar el monitoreo climático y apoyar políticas públicas, especialmente frente a eventos extremos y cambios climáticos.

Palabras clave: ZCIT, Precipitación, Amazonía.

1. INTRODUÇÃO

A Amazônia desempenha um papel essencial na dinâmica climática global devido à sua extensão territorial e à vasta cobertura vegetal que regula os ciclos de energia e água (SALATI; MARQUES, 2000). A região é caracterizada por elevados índices pluviométricos, com uma média anual que varia entre 2.300 mm e 2.460 mm em algumas áreas, como as encostas dos Andes (FREITAS; GIATTI, 2009; ALMEIDA et al., 2015). No entanto, a distribuição da precipitação não é homogênea e está sujeita a alterações sazonais e interanuais influenciadas por diferentes sistemas atmosféricos.

Dentre os principais sistemas que regulam a variabilidade climática regional, destaca-se a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), que se desloca sazonalmente em direção ao hemisfério devido à maior radiação solar. Esse movimento afeta diretamente o padrão de chuvas na região Norte do Brasil, incluindo o estado do Amazonas (MOLION; BERNARDO, 2002). Durante o período chuvoso, que abrange os meses de novembro a maio, observa-se um aumento significativo das precipitações, especialmente em função da atuação da ZCIT e da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS).

Além da influência direta da ZCIT, a precipitação na Amazônia também é modulada por eventos climáticos de grande escala, como o El Niño-Oscilação Sul (ENOS) e a La Niña (GASH et al., 2004). Durante os episódios de El Niño, as precipitações tendem a reduzir significativamente em algumas áreas da região, enquanto durante a La Niña há um aumento dos índices pluviométricos (MARENGO; ESPINOZA, 2016).

Estudos apontam também para a importância de analisar variáveis atmosféricas como a radiação de onda longa (ROL), a temperatura de brilho e os ventos meridionais, que auxiliam na identificação dos padrões de formação de nuvens e de precipitação na região (MENDES et al., 2000; LIMBERGUER et al., 2018). O monitoramento dessas variáveis permite uma melhor compreensão das dinâmicas envolvidas na distribuição espacial e temporal das precipitações.

A variabilidade da precipitação no estado do Amazonas apresenta impactos significativos não apenas para a ecologia da região, mas também para as populações humanas e para atividades econômicas como a agricultura, a pesca e a navegação. Eventos extremos, como enchentes e secas, são frequentes e podem comprometer o abastecimento de água, a segurança alimentar e a conservação ambiental.

Portanto, esta pesquisa tem como objetivo identificar padrões de distribuição de chuvas na região do Amazonas ao longo de diferentes períodos sazonais. Devido a escassez da rede de observação meteorológica de superfície foi utilizado os dados do satélite TRMM e para tal foi realizada uma comparação entre estes dados com a rede de observação existente com o intuito de avaliar a acurácia dos dados utilizando para tal a correlação de Pearson.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O método de estudo adotado foi a Teoria Geossistêmica, que permitiu analisar holisticamente as interações entre os componentes do sistema geográfico. A abordagem permitiu compreender detalhadamente os processos envolvidos, viabilizando estratégias eficazes e sustentáveis de gestão ambiental e planejamento territorial.

2.1. Área de estudo

O Estado do Amazonas (Figura 1) é o maior do Brasil em extensão territorial, localizado na região Norte, possui uma área de aproximadamente 1.559.148,890 km². A população é estimada em cerca de 4,2 milhões de habitantes, dividido em 62 municípios, com mais da metade residente na capital Manaus.

A região do Amazonas é caracterizada por uma rica biodiversidade, com a maior floresta tropical do mundo cobrindo a maior parte do território. A região é também conhecida por sua rede hidrográfica, que inclui o rio Amazonas, o maior do mundo em volume de água, com 6.570 quilômetros de extensão. O estado é banhado por uma infinidade de rios interligados, formando uma rede hidrográfica integrada.

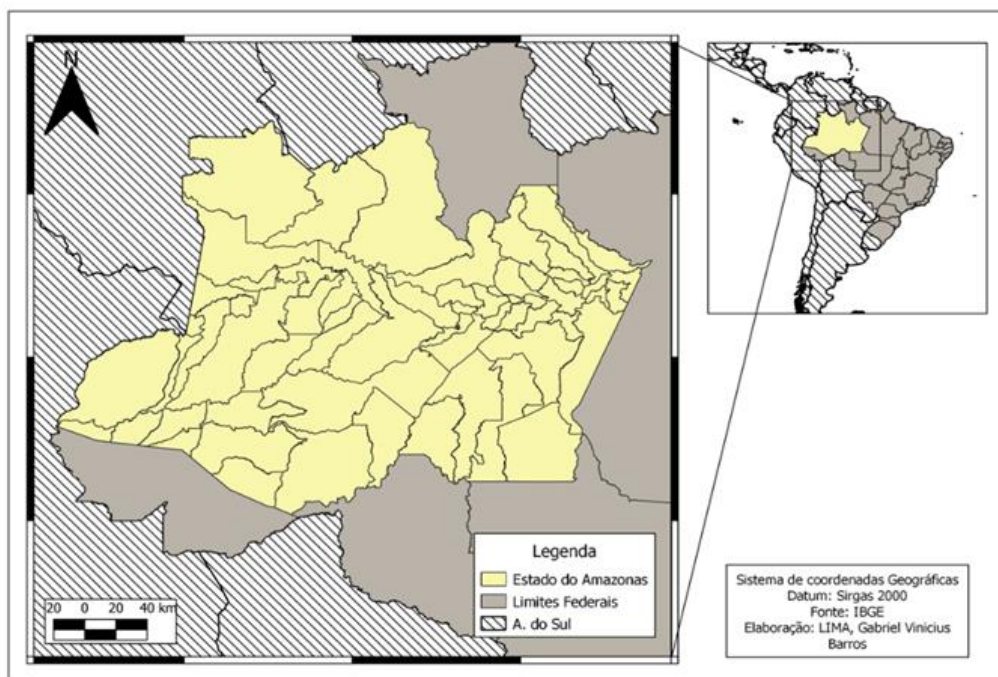


Figura 1 - Localização do estado do Amazonas.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

2.2. Dados Utilizados

O Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) é responsável por coletar e analisar dados meteorológicos em todo o Brasil, incluindo dados de precipitação, que é uma das variáveis climáticas mais importantes. A atualização dos dados mensais de precipitação do INMET é feita com base em dados medidos por uma rede de estações meteorológicas espalhadas pelo país. Os dados de precipitação utilizados para a pesquisa foram de estações meteorológicas convencionais, são dados mensais dos registros de precipitação e que compreendem 11 estações do estado do Amazonas que apresentam maior consistência dos registros e evitando ausência dos dados para o período de estudo definido.

A figura 2 exibe a localização das estações meteorológicas INMET no estado do Amazonas, estão distribuídas nas seguintes regiões: São Gabriel da Cachoeira no Norte, Barcelos no Noroeste, Fonte Boa no oeste, Benjamin Constant e Eirunepé no sudoeste, Tefé no centro-oeste, Lábrea no sul, Manicoré no sul-central, Codajás no centro-sul, Manaus no centro-leste e Itacoatiara no leste.

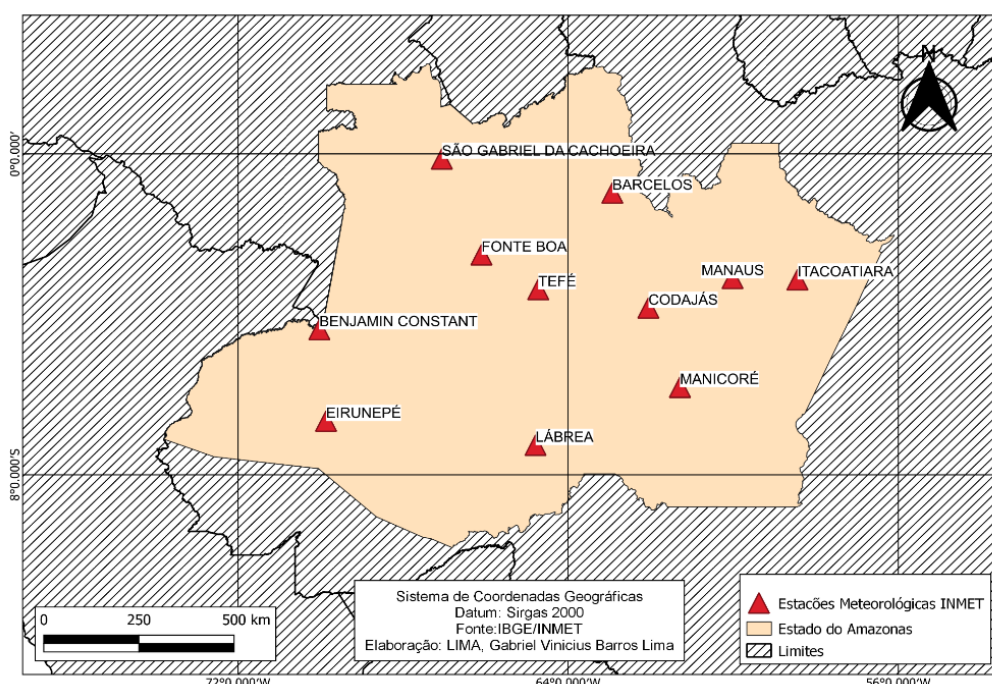


Figura 2 - Mapa de localização das estações meteorológicas.
Fonte: IBGE e INMET, 2024.

Para a realização deste estudo foram utilizadas informações obtidas do satélite TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission), juntamente com dados do produto 3B43 v7. São estimativas mensais somadas do produto diário do 3B42 v7 que são atualizadas a cada 3 horas, podem ser acessadas gratuitamente no site da NASA. Os dados abrangem o período de janeiro de 2002 a dezembro de 2019. O TRMM foi uma missão conjunta da NASA e JAXA (1997-2015) para monitorar chuvas tropicais e subtropicais. Seu produto 3B43 v7 combina dados do radar de precipitação (PR), sensores de micro-ondas (TMI), satélites geoestacionários (infravermelho) e estações terrestres para gerar estimativas mensais de chuva. A resolução espacial é de 0,25° x 0,25° (cerca de 28 km no equador), com cobertura entre 40°S e 40°N. Os dados, em mm/h ou mm/mês, estão disponíveis de janeiro/1998 a dez/2019. O algoritmo do 3B43 v7 ajusta as estimativas de satélite com observações terrestres, priorizando micro-ondas para precisão e infravermelho para atualizações frequentes. É usado em estudos climáticos, hidrológicos, agrícolas e de desastres naturais. Os dados são gratuitos no NASA Earthdata (www.nasa.gov), em formatos HDF ou NetCDF.

2.3 Análise dos Dados

O coeficiente de correlação de Pearson é muitas vezes atribuído apenas a Karl Pearson, mas Stanton (2001) salientou que a sua origem remonta ao trabalho colaborativo de Karl Pearson e Francis Galton. Segundo Garson (2009), correlação é uma medida da associação entre duas variáveis. Moore (2007) define correlação como uma medida para mensurar o grau de relação entre duas variáveis quantitativas. No Geral, o coeficiente de correlação de Pearson (r) é utilizado para quantificar a associação linear entre as variáveis, e sua fórmula é a seguinte:

$$r = \frac{n(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{[n \sum x^2 - (\sum x)^2][n \sum y^2 - (\sum y)^2]}}$$

Quando duas variáveis apresentam semelhanças na distribuição de seus valores, elas podem ser consideradas associadas. Esta associação pode ser determinada com base na distribuição de frequência ou no compartilhamento de variância. O coeficiente de correlação de Pearson (r) mede especificamente até que ponto a variância é partilhada entre as duas variáveis. O modelo linear, por outro lado, assume que existe uma relação linear entre as variáveis, o que significa que um aumento ou diminuição numa variável corresponde a uma mudança proporcional na outra variável ao longo de uma linha reta.

O coeficiente de correlação de Pearson (r) varia de -1 a 1, com o sinal indicando uma correlação positiva ou negativa e o valor refletindo sua força de correlação. Uma correlação de -1 ou 1 significa uma correlação perfeita, onde os valores de uma variável podem ser determinados com precisão pela correlação com os dados da outra. Por outro lado, uma correlação zero indica a ausência de uma relação linear entre as variáveis.

De acordo com Cohen (1988), valores que ficam na faixa de 0,10 a 0,29 podem ser categorizados como pequenos, enquanto os valores que variam de 0,30 a 0,49 podem ser consideradas correlações médias. Valores maiores, variando de 0,50 a 1, indicam uma relação forte. No entanto, Lopes (2016) classifica como ínfima fraco (0,01 a 0,20), fraco ($r = 0,21$ a 0,40), moderada ($r = 0,41$ a 0,60), forte ($r = 0,61$ a 0,80) e ínfima forte (0,81 a 0,99) o quadro 1 abaixo exibe a classificação da correlação de Pearson:

Quadro 1 - Classificação do coeficiente da correlação de Pearson.

Valor de r (+ ou -)	Interpretação
0,00	Nula
0,01 a 0,20	Ínfima Fraca
0,21 a 0,40	Fraca
0,41 a 0,60	Moderada
0,61 a 0,80	Ínfima Forte
0,81 a 0,99	Forte
1	Perfeita

Fonte: Adaptado de Lopes, 2016.

Para o presente estudo, a correlação foi desenvolvida com os dados de precipitação, sendo a variável independente os dados de precipitação observados (INMET), que são considerados a referência ou base para a análise. A variável dependente são os dados de precipitação estimados (TRMM), que é a variável que se supõe ser influenciada ou explicada pelos dados observados. O objetivo é avaliar se os dados estimados (TRMM) conseguem reproduzir de maneira confiável os padrões de precipitação observados (INMET).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Correlação TRMM x INMET

A Figura 3 destaca a correlação dos registros de precipitação de todas as estações tanto dos dados observados e estimados resultando em uma correlação forte de 0,801. Desse modo, indica que os dados de precipitação têm similaridades ou resultados aproximados entre ambas as fontes. Estudos como o de Pereira et al., (2013), destacam a forte correlação dos dados estimados e observados, o autor realizou análise da correlação da precipitação de 183 estações do INMET espalhadas pelo Brasil com os registros de precipitação do TRMM, resultando em uma forte correlação (0,81) indicando que os dados de precipitação têm similaridades ou resultados aproximados entre ambas as fontes.

Além disso, Araújo et al. (2017) validaram os dados do TRMM da estação de Uberaba, MG, e observaram uma forte similaridade, evidenciada pela Correlação de Pearson, entre os dados observados do INMET e os estimados pelo TRMM com uma correlação de 0,997. Outro

estudo relevante é o de Batista (2019), com a finalidade de compreender a precipitação da Amazônica central se utilizou de 6 estações meteorológicas do INMET do estado do Pará, sendo eles o de Altamira, Belterra, Itaituba, Monte Alegre, Óbidos e Porto de Móz. A correlação com os dados estimados variou da mais forte com 0,89 e o menor coeficiente de determinação foi de 0,79. Assim, demonstra que os dados de precipitação fornecidos pelo INMET e TRMM são consistentes e apresentam alta correlação, reforçando a confiabilidade das estimativas de precipitação desses sistemas.

Outro trabalho que valida o uso do TRMM por meio da correlação de Pearson é o de Oliveira (2019) com a pesquisa intitulada “A Variabilidade da Chuva na Amazônia Central: El Niño e La Niña”. A correlação de TRMM e INMET foi feita para o município de Tefé no período de 1998 a 2016, obtendo uma correlação de 0,909, sendo uma correlação quase perfeita. Esse estudo de Oliveira, 2019 mostrou alta correlação e concordância com os dados pluviométricos convencionais, reforçando que os dados estimados são validados e servem para complementar as observações de superfície.

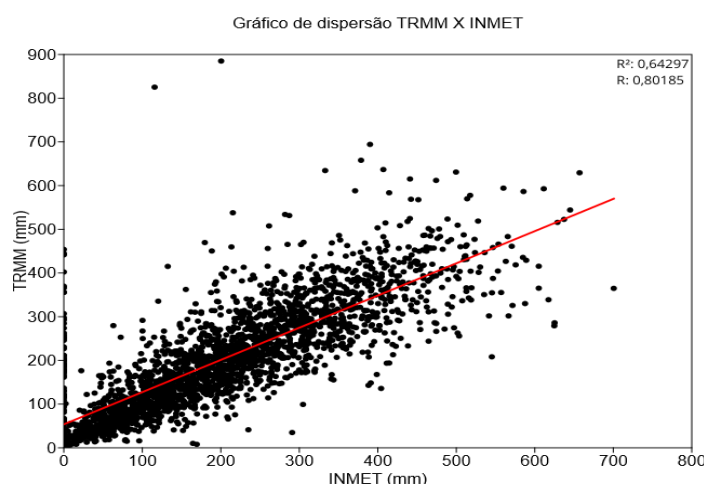


Figura 3 - Regressão linear da correlação de Pearson de todas as estações.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Os gráficos de dispersão (figuras 4 e 5), comparam as medições de precipitação do satélite TRMM com dados terrestres do INMET em duas estações: Benjamin Constant e Itacoatiara. A correlação é menor em Benjamin Constant ($R = 0,727$) e maior em Itacoatiara ($R = 0,893$). Essa diferença pode ser explicada por fatores geográficos e climáticos.

Em Benjamin Constant, a região é de floresta densa e próxima à tríplice fronteira, com microclimas complexos e chuvas convectivas intensas. A topografia acidentada e a heterogeneidade da cobertura vegetal aumentam a variabilidade local, o que pode reduzir a precisão do TRMM. Já em Itacoatiara, a área é mais plana e com menor influência de microclimas extremos, facilita a estimativa de precipitação pelo satélite.

A qualidade dos dados do INMET e a resolução do TRMM também podem influenciar nos resultados. O TRMM tem dificuldade em detectar chuvas localizadas e de curta duração, comuns em regiões tropicais. Em Itacoatiara, a homogeneidade espacial da precipitação pode facilitar a correlação, enquanto em Benjamin Constant, a variabilidade espacial reduz a precisão.

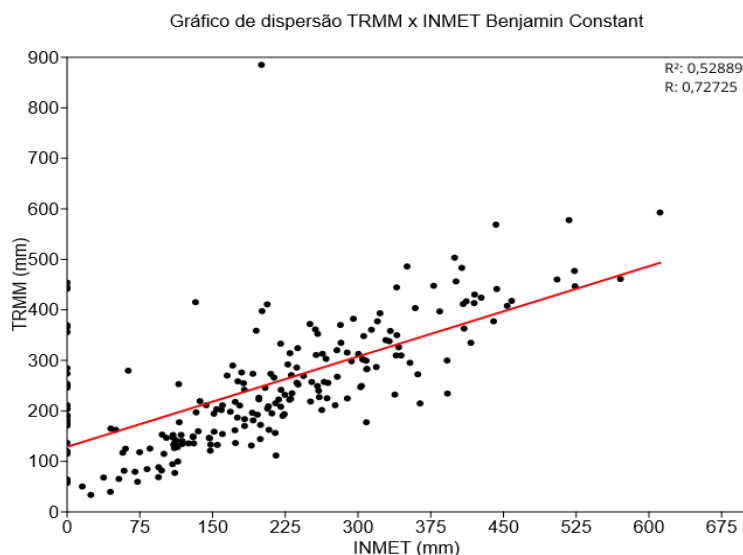


Figura 4 - Regressão linear da correlação de Pearson da estação de Benjamin Constant.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

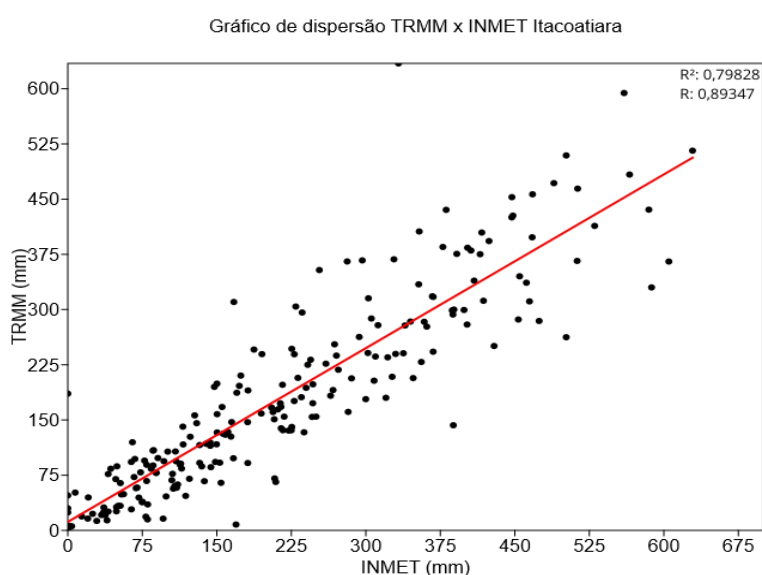


Figura 5 - Regressão linear da correlação de Pearson da estação de Itacoatiara.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

3.2 Variabilidade da precipitação

A variabilidade da precipitação na região Amazônica vista na figura 6 é resultado da interação entre fatores de escala global e regional, evidenciando um complexo comportamento sazonal que se reflete de maneira distinta nas diversas estações meteorológicas. Esse cenário está intimamente ligado à dinâmica da circulação nos trópicos, onde o aquecimento diferencial entre o equador e as latitudes médias, aliado ao efeito Coriolis, impulsiona a formação dos ventos alísios que convergem para a ZCIT. Segundo Uvo (1989) e Hastenrath (1985), a ZCIT é responsável por reunir o ar úmido e promover a intensa atividade convectiva, que caracteriza o

clima equatorial e garante altos índices pluviométricos, especialmente na Floresta Amazônica.

Estudos realizados por Saraiva et al. (2016) destacam que a variabilidade regional das chuvas na Amazônia pode ser analisada através de dados de radar meteorológico, que revelam padrões distintos de refletividade e distribuição vertical das nuvens. Por exemplo, na região norte próxima a Belém, sistemas convectivos profundos são observados ao longo do ano, enquanto na região central, próximo a Manaus, Tefé e Santarém, as chuvas intensas ocorrem principalmente na estação seca.

Nas estações meteorológicas localizadas em áreas centrais e meridionais da Amazônia, como Lábrea (figura 6 A), Manicoré (figura 6 B), Itacoatiara (figura 6 C), Eirunepé (figura 6 D), Codajás (figura 6 E), Manaus (figura 6 F), Tefé (figura 6 G), Fonte Boa (figura 6 H) e Benjamin Constant (figura 6 I) a precipitação apresenta uma forte sazonalidade. Durante os primeiros meses do ano, quando a posição da ZCIT favorece a convecção, os valores de precipitação atingem patamares elevados, com acumulados mensais frequentemente superiores a 300 mm, enquanto nos meses de transição para a estação seca (geralmente de junho a agosto) observa-se uma queda acentuada dos aportes pluviométricos. Essa variação é explicada, em parte, pela migração da ZCIT para o Hemisfério Norte durante o verão boreal, conforme discutido por autores como Molion (1993) e Marengo (2004), que ressaltam a influência da ZCIT na modulação dos padrões de precipitação.

Em contraste, as estações de Barcelos (figura J) e São Gabriel da Cachoeira (figura K), localizadas na região noroeste do Amazonas, demonstram uma menor variabilidade na precipitação ao longo do ano, mantendo uma forte presença de chuvas mesmo nos meses tradicionalmente mais secos. Essa diferença pode ser atribuída à posição geográfica dessas localidades, que estão mais próximas da linha do Equador e, conseqüentemente, permanecem sob a influência contínua da ZCIT. Além disso, a densa cobertura florestal e a topografia local contribuem para a reciclagem da umidade, um processo pelo qual a evapotranspiração da floresta fornece um aporte adicional de vapor d'água, mantendo a convecção ativa e sustentando altos índices pluviométricos durante todo o ano, como apontam Nobre (2007, 2009) e estudos de Espinosa (2011).

Autores como Trenberth e Solomon (1994) e Vianello e Alves (1991) destacam que a circulação de Hadley e a interação entre os ventos alísios e a ZCIT são fundamentais para a distribuição da precipitação na região. Em regiões onde esses mecanismos atuam de forma menos oscilante como em São Gabriel da Cachoeira e Barcelos, observa-se um regime pluviométrico mais uniforme, reduzindo a amplitude entre os períodos de chuva intensa e os meses de relativa seca. Por outro lado, as estações situadas em áreas mais sujeitas à migração sazonal da ZCIT tendem a apresentar uma variação mais acentuada, com secas pronunciadas que podem afetar não só o regime hídrico, mas também os ecossistemas e as atividades humanas locais.

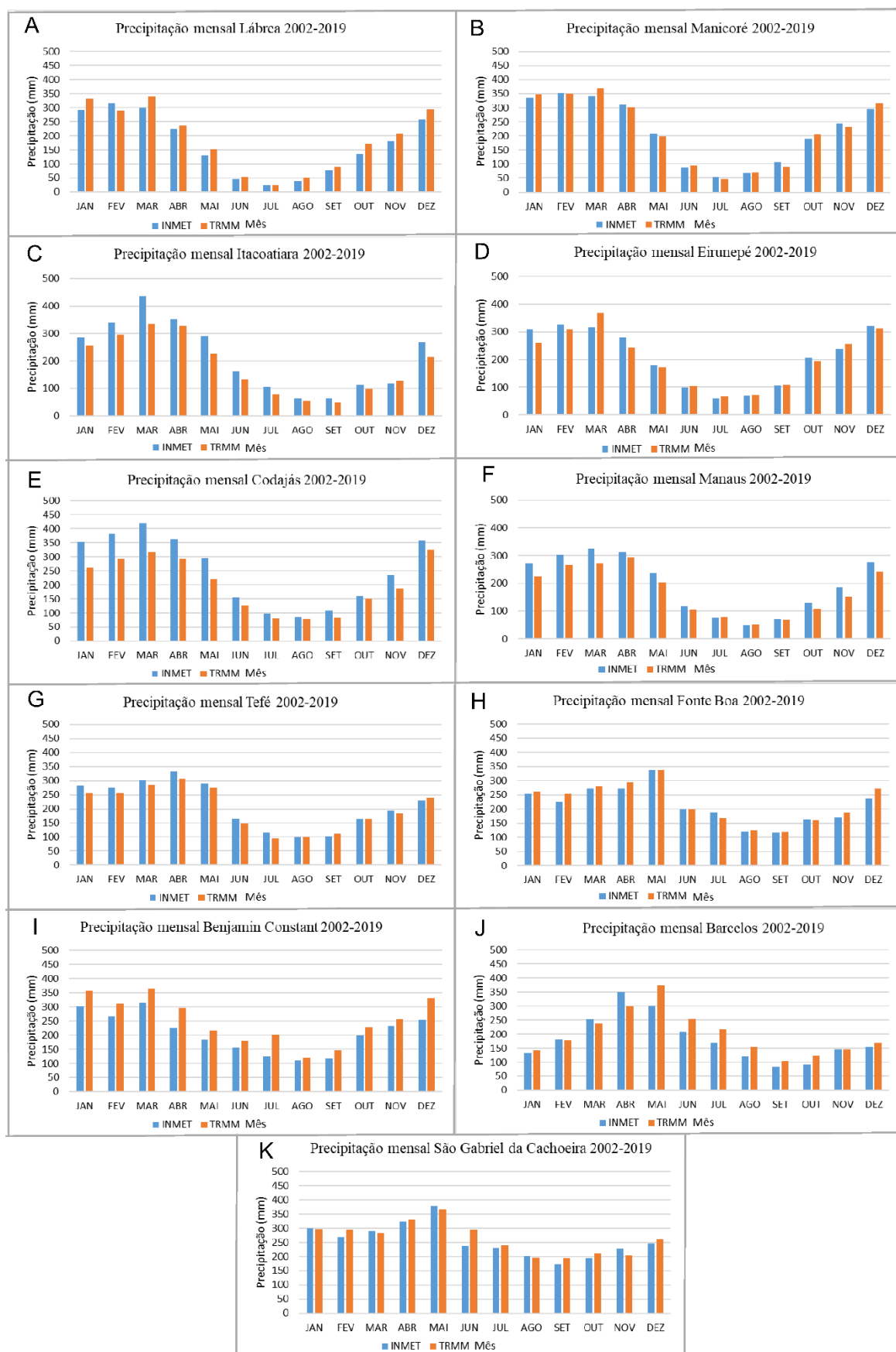


Figura 6 - Precipitação mensal de 2002 a 2019 de Barcelos, Benjamin Constant, Codajás, Eirunepé, Fonte Boa, Itacoatiara, Lábrea, Manaus, Manicoré, São Gabriel da Cachoeira, Tefé.
Fonte: INMET e NASA, 2024.

3.3 Precipitação durante o período da estação chuvosa

As tabelas 1 e 2 dos dados das estações do INMET e TRMM revelam uma concordância nos valores da precipitação bem como da variabilidade sazonal, mas também destacam nuances que refletem a complexidade climática e geográfica da região. Essas similaridades e divergências podem ser exploradas em três dimensões principais: sazonalidade, variabilidade espacial e influência de sistemas meteorológicos.

Sazonalidade e Concordância entre INMET e TRMM

Ambas as fontes de dados capturaram a sazonalidade típica da Amazônia, caracterizada por um pico de precipitação entre fevereiro e março, seguido de uma redução gradual até maio. Na estação de São Gabriel da Cachoeira, os dados do INMET indicam uma precipitação de 377,23 mm em maio, enquanto o TRMM registra uma precipitação de 368 mm, uma diferença de apenas 2,4%. No município de Manaus, os dados observados (INMET) registraram a máxima precipitação de 325,43 mm em março, enquanto os dados do TRMM mostraram precipitação, para o mesmo mês, de 272,8 mm, uma variação de 16,2%. Esta diferença pode ser atribuída à influência de microclimas urbanos não capturados pelo satélite (SILVA et al., 2018), contudo, discrepâncias pontuais, como em Itacoatiara cuja a precipitação observada foi de 436,39 mm no mês de março, e o dado estimado do TRMM foi de 335,2 mm, sugerem limitações metodológicas, o TRMM, devido a sua resolução espacial de 0,25°, pode subestimar chuvas convectivas localizadas, comuns em áreas de transição entre florestas e rios (ALMEIDA et al., 2020).

Variabilidade Espacial e Influência Geográfica

A localização das estações desempenha um papel crítico na variabilidade da precipitação. Estações ao norte, como São Gabriel da Cachoeira, apresentam os maiores volumes pluviométricos em maio (INMET: 377,23 mm; TRMM: 368 mm), influenciadas pela ZCIT, que atua intensamente nesta região durante o período chuvoso, estendendo até esta data. A proximidade com o Rio Negro também contribui para a alta umidade (NEVES et al., 2019). Já estações ao sul, como Lábrea, Eirunepé e Manicoré registraram as máximas precipitações no mês de fevereiro refletindo o deslocamento precoce da ZCIT para o hemisfério norte. Estações centrais, como Manaus, mostram padrões intermediários, com março como mês mais chuvoso (INMET: 325,43 mm; TRMM: 272,8 mm).

Sistemas Meteorológicos e Fatores Locais

A ZCIT é o principal sistema responsável pela sazonalidade da precipitação, mas fatores locais amplificam contrastes. A fisiografia, por exemplo, influencia estações próximas a rios, como Codajás, que apresentam valores elevados em março (INMET: 420,07 mm; TRMM: 317,5 mm), devido à evapotranspiração da floresta. A urbanização também desempenha um papel importante. Manaus é a capital do estado do Amazonas, com uma população em torno de 2,064 milhões, a diferença da precipitação máxima registrada em março entre os dados observados do INMET e os dados do TRMM, de 16,2% pode estar relacionada ao efeito de ilha de calor urbana, que intensifica chuvas convectivas não totalmente capturadas pelo satélite (ARTAXO et al., 2022). A cobertura vegetal também é um fator que pode influenciar a precisão dos dados, o município de Eirunepé, a sudoeste do estado, fica localizado em uma área de floresta nativa intacta o que explica a alta concordância para o mês de março entre INMET de 317,19 mm e TRMM 368,1 mm, pois, segundo ESPINOZA et al., (2016) os dados do TRMM são mais precisos em áreas homogêneas.

Tabela 1 - Valores das estações de dados observados.

ESTAÇÕES	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
INMET												
LÁBREA	292	314	300	225	131	46	24	38	77	136	182	258
MANICORÉ	336	352	341	313	208	89	54	68	108	190	243	296
ITACOATIARA	285	339	436	353	289	162	106	64	64	112	118	269
EIRUNEPÉ	308	325	317	281	181	99	60	71	106	207	239	322
CODAJÁS	352	382	420	363	295	156	98	85	108	161	235	359
MANAUS	273	302	325	312	238	118	75	50	71	129	187	277
TEFÉ	282	277	301	332	290	166	115	99	103	164	192	230
FONTE BOA	254	224	271	271	338	200	187	120	117	164	171	237
BENJAMIN	303	266	315	225	182	156	124	111	116	199	232	255
CONSTANT												
BARCELOS	133	181	253	350	301	208	170	121	84	92	147	154
SÃO GABRIEL DA300	268	289	324	377	237	229	201	173	194	228	245	
CACHOEIRA												

Fonte: INMET, 2024.

Tabela 2 - Valores da média das estações de dados estimados.

ESTAÇÕES TRMM	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
LÁBREA	332	291	341	235	152	53	25	50	89	171	206	294
MANICORÉ	347	349	368	303	198	95	47	70	90	206	232	317
ITACOATIARA	256	296	335	328	226	132	78	55	49	98	127	215
EIRUNEPÉ	260	309	368	244	171	104	69	73	110	193	257	313
CODAJÁS	260	291	318	292	222	126	82	80	84	150	188	325
MANAUS	225	265	273	293	204	106	78	51	70	106	151	243
TEFÉ	255	256	285	307	277	147	95	99	112	163	184	239
FONTE BOA	261	254	280	294	337	198	167	126	119	162	186	273
BENJAMIN	356	311	364	297	217	180	203	121	147	227	256	332
CONSTANT												
BARCELOS	143	176	237	299	374	255	217	155	105	122	146	169
SÃO GABRIEL DA296	294	283	331	368	293	241	197	195	210	204	261	
CACHOEIRA												

Fonte: GIOVANNI/NASA, 2024.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os dados observados do INMET e os dados estimados do satélite TRMM mostraram uma forte correlação, com um coeficiente de Pearson de 0,801, indicando que ambos os conjuntos de dados são confiáveis para análises climáticas na região. Essa concordância reforça a robustez dos dados para análises climáticas em escala regional, corroborando estudos como os de Leivas (2009), que destacam a eficácia do TRMM em regiões de floresta densa, onde estações terrestres são escassas.

No entanto, diferenças pontuais foram observadas, especialmente em áreas com microclimas complexos, como Benjamin Constant, onde a densa cobertura florestal pode reduzir a precisão das estimativas do TRMM. Em contraste, em áreas mais homogêneas, como Itacoatiara e Eirunepé, a correlação foi mais forte, reforçando a utilidade do TRMM em regiões com menor complexidade local.

Diante desses resultados, destaca-se a importância de considerar tanto fatores climáticos globais quanto locais ao analisar a distribuição da precipitação na Amazônia. Além disso, a validação dos dados do TRMM com observações terrestres do INMET reforça a utilidade de técnicas de sensoriamento remoto para o monitoramento climático em regiões de difícil acesso, como a Amazônia. No entanto, é importante reconhecer as limitações dessas técnicas, especialmente em áreas com complexidade fisiográfica.

A análise da distribuição pluviométrica no estado do Amazonas revelou a complexidade e a variabilidade dos padrões de precipitação na região, influenciados por uma combinação de fatores climáticos globais e locais. A ZCIT desempenha um papel fundamental na modulação da precipitação, resultando em variações interanuais significativas. Ademais, a topografia, a cobertura vegetal e a proximidade com grandes corpos d'água, como o Rio Amazonas, contribuem para a heterogeneidade espacial da precipitação.

É importante ressaltar que a atuação da ZCIT não ocorre de forma isolada, sendo modulada por fenômenos climáticos de grande escala, como os eventos de El Niño e La Niña. Durante episódios de El Niño, o aquecimento anômalo das águas do Pacífico equatorial tende a enfraquecer a convecção associada à ZCIT, reduzindo as chuvas em partes da Amazônia e intensificando períodos secos.

Por outro lado, em anos de La Niña, o resfriamento do Pacífico equatorial reforça a atividade convectiva na região, ampliando os volumes pluviométricos e aumentando a frequência de eventos extremos, como enchentes (MARENGO; ESPINOZA, 2016). Essa interação destaca a importância de considerar oscilações climáticas globais no entendimento da variabilidade sazonal e interanual da precipitação, especialmente em um cenário de mudanças climáticas. Embora a influência desses fenômenos seja relevante para a compreensão da variabilidade climática na Amazônia, este estudo focou na análise da ZCIT e sua relação com a precipitação.

Quanto à variabilidade sazonal, observou-se que, para a maioria das estações, os picos de precipitação ocorreram entre fevereiro e maio, enquanto isso, estações ao norte, como São Gabriel da Cachoeira, apresentaram volumes pluviométricos elevados e menor variabilidade, ao passo que estações ao sul, como Eirunepé, Manicoré e Lábrea, registraram reduções mais abruptas durante a estação seca. Essa disparidade pode ser atribuída à migração sazonal da ZCIT, e, no caso do município de Lábrea o baixo valor da precipitação máxima se deve também à mudança na paisagem, onde a floresta deu lugar à exploração agrícola diminuindo com isso o aporte de umidade.

Em termos de implicações práticas, a compreensão detalhada da variabilidade pluviométrica é crucial para o planejamento de atividades econômicas, como a agricultura e a navegação, e para a gestão de recursos hídricos e ambientais. Alterações na ZCIT podem

ocasionar eventos extremos, como secas e enchentes, as quais têm impactos significativos nas comunidades locais e nos ecossistemas, destacando a necessidade de estratégias de adaptação e mitigação baseadas em dados climáticos precisos e confiáveis.

Os resultados destacam a urgência de políticas públicas baseadas em dados climáticos precisos, capazes de mitigar impactos de eventos extremos e promover a gestão sustentável de recursos hídricos e ecossistêmicos. Futuros estudos poderão beneficiar-se da integração de modelos climáticos regionais com dados de alta resolução espacial, além do monitoramento contínuo para capturar tendências em um cenário de mudanças climáticas. Assim, a pesquisa contribui não apenas para o avanço do conhecimento científico, mas também para a construção de estratégias resilientes que harmonizem desenvolvimento socioeconômico e conservação ambiental na Amazônia.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Catherine Torres de et al. Avaliação das estimativas de precipitação do produto 3B43-TRMM do estado do Amazonas. **Floresta e Ambiente**, v. 22, p. 279-286, 2015.

ALMEIDA, R. A. et al. Dinâmica da ZCIT e sua influência na precipitação do norte da Amazônia. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 35, n. 2, p. 201-215, 2020.

ARAÚJO, Sérgio Roberto; DE OLIVEIRA SANCHES, Fábio; FERREIRA, Ricardo Vicente. Metodologia para validação de dados TRMM para Uberaba (MG). **ENTRE-LUGAR**, v. 8, n. 16, p. 131-141, 2017.

ARTAXO, Paulo. Mudanças climáticas: caminhos para o Brasil: a construção de uma sociedade minimamente sustentável requer esforços da sociedade com colaboração entre a ciência e os formuladores de políticas públicas. **Ciência e Cultura**, v. 74, n. 4, p. 01-14, 2022.

BATISTA, Priscila da Silva. **Validação dos dados de precipitação pluvial do produto Merge para a Amazônia Central**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Oeste do Pará, 2019.

COHEN, Jacob. Set correlation and contingency tables. **Applied psychological measurement**, v. 12, n. 4, p. 425-434, 1988.

ESPINOSA, América Murguía; SILVA DIAS, Pedro Leite. **Previsão quantitativa por conjunto da precipitação do verão 2007/2008 na bacia do Rio Grande**. 2011.

FREITAS, Carlos Machado de; GIATTI, Leandro Luiz. Indicadores de sustentabilidade ambiental e de saúde na Amazônia Legal, Brasil. **Cadernos de Saúde Pública**, v. 25, p. 1251-1266, 2009.

GARSON, G. David. **Statnotes: Topics in multivariate analysis**. North Carolina State University. [S.l.: s.n.], 2009.

GASH, J. H. C. et al. Amazonian climate: results and future research. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 78, p. 187-193, 2004.

LEIVAS, Janice Freitas et al. Análise comparativa entre os dados de precipitação estimados via satélite TRMM e dados observados de superfície em Manaus. **Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Natal, Brasil, v. 25, n. 30, p. 1611-1616, 2009.

LIMBERGUER, Leila; SILVA, Maria Elisa Siqueira. Precipitação observada na Amazônia Brasileira: Redes convencionais e dados da Reanálise I do NCEP/NCAR, CRU e GPCC. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 22, 2018.

LOPES, L. F. D. **Métodos Quantitativos**. 1ª edição. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2016.

MARENGO, J. A. **Clima e Recursos Hídricos no Brasil na Época do Aquecimento Global**. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 19, n. 1, p. 1-15, 2004.

MARENGO, J. A.; ESPINOZA, J. C. **Extreme seasonal droughts and floods in Amazonia: Causes, trends, and impacts**. International Journal of Climatology, 2016.

MENDES, D.; VEIGA, J.A.P.; DE MOURA, R.G.; GONDIM, M.A.; CEBALLOS, J. Monitoramento da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) através de dados de temperatura de brilho. In: **Anais do XI Congresso Brasileiro de Meteorologia**, Rio de Janeiro. 3897-3901, 2000.

MOLION, L. C. B. Amazonia rainfall and its variability. In: **Hydrology and water management in the humid tropics** BONELL, M.; HUFSCHEIDT, M. M.; GLADWELL, J. S. (eds.). International Hydrology Series, Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido, p. 99-111, 1993.

MOLION, L. C. B.; BERNARDO, S. O. Uma revisão sobre a dinâmica climática da Amazônia e seus principais sistemas atmosféricos. **Revista Brasileira de Meteorologia**, 2002.

MOORE, David S.; KIRKLAND, Stephane. **The basic practice of statistics**. New York: WH Freeman, 2007.

NEVES, Raísa Rodrigues et al. Caracterização pluviométrica da bacia hidrográfica do Rio Negro em território brasileiro. **Revista AIDIS de ingeniería y ciencias ambientales: Investigación, desarrollo y práctica**, p. 280-294, 2019.

NOBRE, Carlos A. et al. Mudanças climáticas e Amazônia. **Ciência e Cultura**, v. 59, n. 3, p. 22-27, 2007.

NOBRE, Carlos Afonso; BORMA, Laura De Simone. 'Tipping points' for the Amazon forest. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, v. 1, n. 1, p. 28-36, 2009.

OLIVEIRA, R. N. **A variabilidade da chuva na Amazônia Central: El Niño e La Niña**. 2019. 117 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2019. Disponível em: <https://tede.ufam.edu.br/handle/tede/7159>. Acesso em: 24 dez. 2024.

PEREIRA, Gabriel et al. Avaliação dos dados de precipitação estimados pelo satélite TRMM para o Brasil. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 18, n. 3, p. 139-148, 2013.

SALATI, E.; MARQUES, J. **O ciclo hidrológico na Amazônia**. Ciência hoje, 2000.

SARAIVA, Ivan et al. Regional variability of rain clouds in the Amazon basin as seen by a

network of weather radars. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 55, n. 12, p. 2657-2675, 2016.

SILVA, F. D. et al. Precipitação na Amazônia: comparação entre dados de satélite e estações superficiais. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 33, n. 2, p. 257-268, 2018.

STANTON, Jeffrey M. Galton, Pearson, and the peas: A brief history of linear regression for statistics instructors. **Journal of Statistics Education**, v. 9, n. 3, 2001.

TRENBERTH, Kevin E.; SOLOMON, Amy. The global heat balance: Heat transports in the atmosphere and ocean. **Climate Dynamics**, v. 10, p. 107-134, 1994.

UVO, C. R. B. **A zona de convergência intertropical (ZCIT) e sua relação com a precipitação na região norte e nordeste brasileiro**. 1989, 215f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia). São José dos Campos, INPE, São Paulo. 1989.

VIANELLO, R. L.; ALVES, A. R. **Meteorologia básica e aplicações**. Viçosa: Imprensa Universitária/UFV, 1991. 449 p.