



Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbge>



Estimativa de precipitação dos dados CHIRPS e GPCC em anos de extremos climáticos, Bacia Hidrográfica do rio Guamá-PA

Dênis José Cardoso Gomes¹, Norma Ely Santos Beltrão², Fabianne Mesquita Pereira³, Ana Carolina Moraes Reis⁴, Ana Monoela Piedade Pinheiro⁵, Davi Farias da Silva⁶.

¹Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais na Universidade do Estado do Pará - UEPA (2021) e membro do grupo de pesquisa NUPAD - Núcleo de Pesquisas Aplicadas ao Desenvolvimento Regional aplicando técnicas de geoprocessamento e sensoriamento remoto para investigar as influências climáticas e antrópicas nos cenários hidroambientais, processos erosivos e serviços ecossistêmicos. Meteorologista graduado na Universidade Federal do Pará - UFPA (2020). deniss.feg@gmail.com (e-mail correspondente).

²Pós-doutorado em Sensoriamento Remoto na Faculdade de Ciências da Universidade do Porto (FCUP), Portugal (2017-2019), doutorado em Economia Agrícola na Justus-Liebig-Universität Giessen na Alemanha (2008), reconhecido pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) como Doutorado em Desenvolvimento Rural, mestrado em Engenharia de Produção pela Universidade Federal de Santa Catarina (1996), e graduação em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Pará (1992). É professora efetiva da Universidade do Estado do Pará (UEPA).

³Tecnóloga em Saneamento Ambiental, formada pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará (IFPA). Mestranda no Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais (PPGCA) da Universidade do Estado do Pará (UEPA).

⁴Graduação em Engenharia Ambiental e Energias Renováveis pela Universidade Federal Rural da Amazônia, mestranda do Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais da Universidade do Estado do Pará.

⁵Mestranda no Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais da Universidade do Estado do Pará (UEPA). Especialista em Direito Urbanístico e Ambiental pela Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUC-Minas). Bacharel em Direito pelo Centro Universitário do Estado do Pará (CESUPA).

⁶Técnico em Saneamento pelo Instituto Federal do Pará (2018), Engenheiro Ambiental pela Universidade Federal Rural da Amazônia (2018), Especialista em Gestão, Consultoria, Auditoria, Perícia e Fiscalização Ambiental pela Faculdade Estácio (2019-2021), Especialista em Geoprocessamento e Georreferenciamento de Imóveis Rurais pela Universidade Federal Rural da Amazônia (2021) e Mestre em Ciências Ambientais pela Universidade do Estado do Pará.

Artigo recebido em 18/01/2022 e aceito em 26/05/2022

RESUMO

As mudanças climáticas têm provocado maior frequência e intensidade de eventos extremos em todo mundo. Então, o monitoramento hidroclimático é essencial para o conhecimento da variabilidade. O objetivo deste trabalho é analisar o desempenho dos conjuntos de dados CHIRPS e GPCC na estimação da precipitação em anos de extremos climáticos na bacia hidrográfica do rio Guamá. Utilizou-se índices climáticos da *National Oceanic and Atmospheric Administration*, dados pluviométricos medidos da Agência Nacional de Águas, conjunto de dados estimados *Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Stations* e *Global Precipitation Climatology Center*. Calculou-se a média e o desvio padrão da chuva ao longo dos anos para detecção dos anos extremos. Realizou-se análises estatísticas para aferição da qualidade dos dados estimados. Construiu-se gráficos para analisar a variação temporal e mapas em ambiente de Sistema de Informação Geográfica para a observação espacial da chuva estimada. A estatística mostrou melhor correlação para Belém, ajuste perfeito e sem erros significativos para Irituia, apesar tendências de subestimação elevada do GPCC. Os indicadores climáticos estão bem associados aos anos extremos. Em anos de El Niño e Dipolo positivo identifica-se a redução das chuvas principalmente á Sudeste. Em contrapartida, no La Niña e o Dipolo negativo observa-se o aumento da precipitação concentrando-se na parte Noroeste. Há tendências de excedente pluviométrico na bacia hidrográfica do rio Guamá (CHIRPS), sendo o produto mais representativo da variabilidade em anos extremos. Assim, questionamentos sobre o quanto os eventos climáticos provocam maior dificuldade na estimação pluviométrica em áreas sem medições, precisam ser mais investigados para melhoria dos produtos estimadores de chuva.

Rainfall estimate from CHIRPS and GPCC data in years of extreme weather, Guamá watershed-PA

ABSTRACT

Climate change has caused greater frequency and intensity of extreme events around the world. So, hydroclimatic monitoring is essential for understanding the spatial and temporal variability of precipitation, which is generally the meteorological element that conducts natural disasters. The objective of this scientific study is to analyze the performance of the CHIRPS and GPCC datasets in the estimation of the spatial-temporal variability of rainfall in years of climatic extremes in the Guamá watershed. Used the National Oceanic and Atmospheric Administration climate indices, measured rainfall data from the National Water Agency, an estimated Climate Hazards Group, InfraRed Precipitation with Stations and Global Precipitation Climatology Center dataset. The mean and standard deviation of rainfall over the years was

calculated to detect extreme years. Performed statistical calculations to measure the quality of estimated data. Graphs were built to analyze temporal variation and maps in a Geographic Information System environment for the observation of the spatial distribution of estimated rainfall. The statistic showed better correlation for Belém, perfect fit and no significant errors for Irituia, although high underestimation tendencies of the GPCC. Weather indicators are well associated with extreme years. In years of El Niño and positive Dipole, there is a reduction in rainfall, especially in the Southeast region. Though, when there is La Niña and a negative Dipole, there is an increase in rainfall, concentrating in the Northwestern region. There are trends in excess rainfall in the Guamá watershed (CHIRPS), being the most representative product of variability in extreme years. Thus, questions about the extent to which weather events cause greater difficulty in estimating rainfall in areas without measurements need to be further investigated to improve rainfall estimation products.

Introdução

As mudanças climáticas nas últimas décadas têm sido fortemente debatidas pela comunidade científica (Almeida et al., 2020; Silva et al., 2021; Zákha et al., 2021; Boulton et al., 2022). Alguns sugerem que a humanidade está acelerando este processo (Ramires e Mello-Théry, 2018) como por exemplo o desmatamento reduzindo a precipitação na região amazônica (Leite-Filho), o que pode ser agravado pelas mudanças climáticas (Staal et al., 2020). Assim, esta população pode ser atingida pelas consequências desses eventos extremos de precipitação (Moura et al., 2019) que provocam desastres naturais (Gomes et al., 2021c). Silva et al. (2018) complementam que as ações antrópicas modificam a cobertura vegetal, desequilibrando o processo natural de interação biosfera-atmosfera e consequentemente os padrões hidroclimatológicos regionais.

Além disto, extremos climáticos impactam de maneira indireta o ser humano quando prejudicam a produção alimentar no setor agrícola (Haile et al., 2017). Outro fator é a degradação ambiental, onde eventos extremos suscetibilizam áreas a processos erosivos (Gomes et al., 2021a) que podem retardar as atividades de agricultura, além de danificar infraestruturas colocando em risco vidas humanas.

Os eventos extremos ocorrem devido a atuação dos fenômenos climáticos, sendo os mais frequentes e os que afetam consideravelmente o regime pluviométrico na região Amazônica são o El Niño Oscilação Sul (ENOS) e o Dipolo do Atlântico (Lewis et al., 2011; Marengo et al., 2012). O ENOS origina-se no oceano Pacífico tropical consistindo em duas fases com características térmicas opostas. O El Niño é quando há aquecimento anômalo das águas superficiais da região do Pacífico tropical e o La Niña é o processo oposto, ou seja, o resfriamento das águas desta parte do oceano (Rodrigues et al., 2021). O Dipolo do Atlântico é oriundo da parte tropical do oceano Atlântico, constituído da sua fase positiva e negativa (Towner et al., 2020).

Por tanto, o monitoramento da influência de mecanismos climáticos na precipitação (Reboita

et al., 2021) torna-se imprescindível como componente de análise para um melhor planejamento e prevenção de eventos extremos (Espinoza et al., 2022). Rocha e Lima (2020) reforçam em sua pesquisa a importância de estudos voltados para a gestão dos recursos hídricos com enfoque na sustentabilidade hídrica com finalidade de haver uma maior manutenção do equilíbrio entre oferta e demanda. Logo, a caracterização espaço-temporal da variabilidade pluviométrica (Silva Neto et al., 2020) é fundamental para o seu entendimento, uma vez que se pode detectar sua padronização, mudanças de intensidade e frequência (Melo e Lima, 2021).

Entretanto, a baixa densidade da rede de pluviômetros relatada por Mello et al. (2017) e as falhas nas séries de dados (Ruezzene et al., 2021) dificultam o monitoramento das chuvas. Diante desta problemática, Brubacher et al. (2020) sugeriram a espacialização pluviométrica através de técnicas geoestatísticas como a krigagem, na qual segundo Yang et al. (2015) este procedimento regionaliza as variáveis considerando um certo grau de continuidade na área de interpolação. Gomes et al. (2021a) aplicou esta técnica na bacia hidrográfica do rio Capim (adjacente a bacia do rio Guamá) utilizando o conjunto de dados do GPCC (Becker et al., 2013).

Outro produto de dados pluviométricos espacializados é o CHIRPS, em que é baseado nas estimações de satélites e com resoluções espaço-temporais excelentes (Mu et al., 2021). Este produto é bastante recomendado por sua qualidade, pois é uma combinação da precipitação medida na superfície (pluviômetro) com a precipitação estimada pelos satélites (Cavalcante et al., 2020), o que pode melhorar a identificação de extremos climáticos.

Tais eventos extremos muitas vezes são decorrentes dos efeitos da interação oceano-atmosfera e modulam a precipitação padrão na Amazônia, onde está situada a Bacia Hidrográfica do rio Guamá (BHG). Este sistema de drenagem é um dos mais importantes do Estado do Pará, pois seus limites compõem grande parte da região metropolitana de Belém (Kubota et al. 2020). Deste modo, analisar o potencial hídrico da região é

essencial para o planejamento ambiental e territorial (Bonini et al., 2014), além de conhecer como e o quanto o padrão de distribuição espacial de chuva varia sob influência de fenômenos climáticos (Gomes et al., 2021c). E apesar de Paca et al. (2020) mostrar a eficiência do conjunto de dados CHIRPS para a bacia hidrográfica do rio Amazonas, uma análise para a Amazônia oriental (BHG) é crucial para o complemento do desempenho deste produto para região amazônica.

Neste sentido, o objetivo deste trabalho é analisar o desempenho dos conjuntos de dados CHIRPS e GPCC na estimação da variabilidade espaço-temporal da precipitação em anos de extremos climáticos na Bacia Hidrográfica do rio Guamá.

Material e métodos

Área de estudo

A BHG (Fig.1) se situa na Amazônia oriental, mais especificamente no Nordeste Paraense, abrangendo uma área de aproximadamente 12.584,0 km² (Kubota et al., 2020). O sistema hidrológico da BHG é constituído por 8 sub-bacias (Baixo Guamá, Igarapé Apeú, rio Bujaru, Médio Guamá setor oeste, Médio Guamá setor leste, Igarapé Mãe do Rio, rio Sujo e Alto Guamá) proposta por Rocha e Lima (2020).

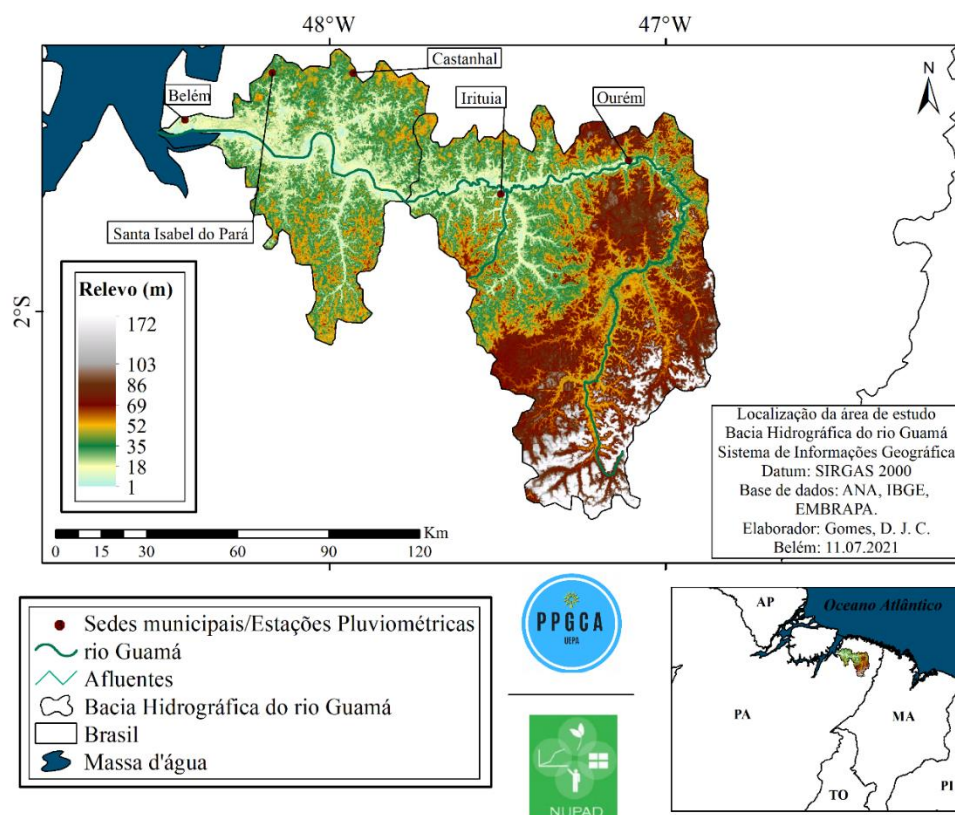


Figura 1. Localização da área de estudo: Bacia Hidrográfica do rio Guamá. Fonte: ANA (2021); IBGE (2021). EMBRAPA (2021). Adaptado por autor (2020).

Aquisição e Processamento de dados

Os dados de índices climáticos foram obtidos na plataforma virtual da *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA, 2021). Em que tais índices são baseados nas anomalias de Temperatura da Superfície do Mar (TSM) representando o oceano Pacífico tropical pelo Índice Oceânico Niño (ION) e o Atlântico tropical através do Atlântico Norte Tropical (ANT) e Atlântico Sul Tropical (AST).

A precipitação pluviométrica real (1985-2019) foi adquirida por meio das medições dos pluviômetros disponibilizados pela Agência Nacional de Águas (ANA) no portal HidroWeb (ANA, 2021). Para a precipitação pluviométrica estimada, utilizou-se o conjunto de dados CHIRPS (*Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Stations*) com resolução espacial de 0,05° (~ 5 km), proposto por Funk et al. (2015) e aplicado para o Brasil por Costa et al. (2019). Tais dados

estão disponíveis em: <https://www.chc.ucsb.edu/data/chirps>. Outro produto de precipitação usado foi o *Global Precipitation Climatology Center* (GPCC, 2021), possuindo resolução espacial de 1,0° x 1,0°. Estes dados são baseados através de uma interpolação espacial complexa das estações de superfície (Passow, 2010; Becker et al., 2013; Gomes et al., 2021).

Organizou-se em planilhas os índices climáticos para identificar os períodos de anomalias extremas. Segundo a NOAA (2021) os valores anômalos do ION são uma média trimestral contínua (Ex: DJF – Dezembro, Janeiro e Fevereiro; JFM – Janeiro, Fevereiro e Março, etc.) da TSM na região Niño 3.4 (Pacífico tropical). Gomes et al. (2021) complementam em sua pesquisa, relatando que quando o ION atinge valores superiores a + 0,5 °C por cinco meses seguidos ou mais, é classificado como um evento de El Niño. Contudo, caso seja registrado valores do ION inferiores a - 0,5 °C por cinco meses subsequentes ou mais, há a ocorrência do La Niña.

Para os índices do oceano Atlântico tropical, Souza et al. (2005) consideram a formação do fenômeno Dipolo do Atlântico positivo (negativo) somente quando a diferença entre os valores anômalos da ANT e AST for maiores/igual a 0,2 °C (menores/igual a -0,2 °C) por no mínimo quatro meses consecutivos.

Seguindo a linha de raciocínio de Souza et al. (2005) e Gomes et al. (2021), observou-se que houve anomalias extremas no período de estudo (1985-2019). Porém, para a análise foi selecionado os anos com fenômenos climáticos mais intensos e com extremos pluviométricos anuais observados acima e/ou abaixo do desvio padrão como: El Niño (1991, 1997, 2010, 2012, 2015); La Niña (1985, 1986, 1988, 1989, 1994, 2000, 2018); Dipolo do Atlântico positivo (1997, 2010, 2012) e negativo (1985, 1986, 1989, 1994).

A construção dos mapas representativos da distribuição espacial pluviométrica dos anos extremos ocorreu em ambiente de Sistema de Informações Geográficas (SIG), para os dados do CHIRPS e GPCC. Este último passando pela interpolação da krigagem (Goovaerts, 2000). A krigagem consiste em uma técnica geoestatística complexa que estima a variação na superfície baseado em uma grade de pontos distribuídos (Yang et al., 2015) que representam dados conhecidos para estimar valores desconhecidos nas áreas entre os pontos (Ryu et al., 2021).

Na avaliação da qualidade dos dados estimados (Serrão et al., 2016; Souto et al., 2019), usou-se cálculos estatísticos quantitativos e qualitativos. Deste modo, foi aplicado o coeficiente

de correlação de Pearson (r) descrito pela Eq. 1 e coeficiente de determinação (r^2) pela Eq. 2 nos dados reais e estimados (CHIRPS e GPCC).

$$r = \frac{\sum (X - \bar{X}) \cdot (Y - \bar{Y})}{\sqrt{\sum (X - \bar{X})^2 \cdot \sum (Y - \bar{Y})^2}} \quad (\text{Eq. 1})$$

$$r^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (\text{Eq. 2})$$

Para Pisani Junior (2018), o r mede o grau de relação entre variáveis com valores adimensionais (-1 a 1) indicando a magnitude de dependência dos dados avaliados e como oscilam na medida que aumentam e/ou diminuem. Os mesmos autores complementam que o r^2 é o valor que determina a qualidade de calibração estatística, indicando o quanto a estimação de uma variável é capaz de explicar os valores observados através da porcentagem (0 a 1).

Assim, aplicou-se o coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS) mostrado na Eq. 3, em que possui a finalidade de analisar a eficácia na modelagem hidrológica (Rata et al., 2020), com valores (-1 a 1), mostrando o nível acurácia do cálculo e classificando como ótimo acima de 0,90, como foi feito com o conjunto de dados do GPCC por Dias et al. (2020). O Índice de Willmott (IW) descrito na Eq. 4 indica o quanto os valores estimados de precipitação estão próximos da observação, no qual variam de 0 a 1 e quando o IW > 0,85 significa eficiência excelente (Damé et al., 2014).

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_{Est} - P_{Obs})^2}{\sum_{i=1}^n (P_{Obs} - \bar{P}_{Obs})^2} \quad (\text{Eq. 3})$$

$$IW = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (V_{Est} - V_{Obs})^2}{\sum_{i=1}^n (|V_{Est} - \bar{V}_{Obs}| + |V_{Obs} - \bar{V}_{Obs}|)^2} \quad (\text{Eq. 4})$$

Conforme Serrão et al. (2016), foi usado o Erro Relativo de Volume Precipitado (ERRV) representado pela Eq. 5 para se obter a porcentagem da subestimação ou superestimação dos dados estimados (CHIRPS e GPCC) em relação aos reais no pluviômetro. Para medir a aferição dos dados estimados e reais, usou-se o coeficiente de U de Theil (Eq. 6), em que $U > 1$ significa a superestimação em comparação aos dados reais e $U < 1$ a subestimação; $U \cong 0$ indica a proximidade dos dados estimados dos reais (Serrão et al., 2016; Dias et al., 2020).

$$ERRV (\%) = 100 \cdot \frac{\sum_{i=1}^n P_{Est} - P_{Obs}}{\sum_{i=1}^n P_{Obs}} \quad (\text{Eq. 5})$$

$$U = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (V_{est} - V_{obs})^2}{(\sum_{i=1}^n (V_{obs})^2)}} \quad (\text{Eq. 6})$$

Resultados e discussão

Estatística

A estatística de validação (Tab. 1) representa o quanto os dados estimados (CHIRPS e GPCC) aproximam-se das observações medidas (Pluviômetro). Desta maneira, os índices foram bastante concisos, ressaltando Belém com um alto grau de correlação positiva e explicação ($r = 0,91$ e $r^2 = 0,84$) para o CHIRPS e $r = 0,95$ e $r^2 = 0,90$ para GPCC. Apesar dos indicadores de NS (0,99) e IW (0,99) apontarem um forte ajuste na estimação pluviométrica, o ERRV sugere subestimação aceitável no volume de chuva para ambos os estimadores, com o índice U ratificando a qualidade dos valores para Belém.

Outro destaque é para Irituia, apresentando bons valores de correlação e coeficiente de determinação (ambos estimadores), uma calibração perfeita (CHIRPS) mostradas pelos NS e IW, sem nenhum erro significativo no volume de precipitação confirmado pelo índice U. Contudo, Cavalcante et al. (2020) observaram que o CHIRPS subestima a precipitação em eventos extremos de excedente hídrico, fato observado apenas em Belém.

Tabela 1. Estatística de validação.
Pluviômetro x CHIRPS

	r	r ²	NS	IW	ERRV	U
Belém	0,91	0,84	0,99	0,99	-7,2%	0,07
SIP	0,84	0,71	0,99	0,99	7,3%	0,07
Castanhal	0,81	0,66	0,98	0,99	14,3%	0,14
Irituia	0,89	0,79	1	1	0%	0,0
Ourém	0,90	0,80	0,99	0,99	5,5%	0,05
Pluviômetro x GPCC						
	r	r ²	NS	IW	ERRV	U
Belém	0,95	0,90	0,99	0,99	-15,7%	0,16
SIP	0,82	0,67	0,99	0,99	-6,9%	0,07
Castanhal	0,70	0,49	0,99	0,99	-14,2%	0,02
Irituia	0,83	0,63	0,99	0,99	2,4%	0,0
Ourém	0,85	0,72	0,97	0,99	14,6%	0,15

Fonte: Autor (2021).

Índices climáticos e Precipitação

A Fig. 2a descreve a variabilidade anual média das anomalias climáticas representados pelos seus respectivos índices. Os anos de maior aquecimento superficial das águas do Pacífico tropical são 1987 (1,28 °C), 1997 (1,17 °C) e 2015

(1,49 °C), sendo observado anomalias positivas com intensidade e ocorrência trimestral suficiente para identificar a formação de eventos de El Niño forte. Entretanto, nos anos de 1988 (-0,81 °C), 1999 (-1,23 °C) e 2011 (-0,83 °C), há registros de águas frias com valores e frequência trimestral altos, podendo classificar como a atuação do fenômeno do La Niña.

No Atlântico tropical, observa-se tendência de aumento a partir de 1995 em diante. Contudo, o destaque são os anos de 2005 e 2010 que apresentaram maior aquecimento nas águas da parte norte em relação ao sul. Isto configura o Dipolo positivo. Em 1986 e 2019, ocorreram eventos de Dipolo negativo caracterizado pelos valores mais altos das águas do Atlântico Sul em comparação ao Atlântico Norte.

A fase negativa do Dipolo significa predominância de altas pressões no Atlântico Norte, provocando maior intensidade dos ventos alísios de Nordeste e deslocando na direção Sul o principal sistema meteorológico indutor de precipitação nessa região, a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), aumentando o regime de chuvas na Amazônia setentrional (ASSIS et al., 2018).

Segundo Souza Neto et al. (2021), há tendências de aquecimento no setor sul dos oceanos Atlântico e Pacífico, com este último apresentando maior valores de águas quentes. Esses resultados podem indicar maior possibilidade de ocorrência de eventos de El Niño e Dipolo positivo.

Na Fig. 2b observa-se a variabilidade anual pluviométrica de Belém-PA. Apesar de 2017 (943,6 mm) apresentar o menor valor de precipitação, não se constatou nenhum fenômeno na escala climática, baseado nos índices (ATN, ATS e ION), que possa ter inibido a chuva neste período. Porém, em 1991 (2.385,2 mm) a precipitação foi registrada como 22,6 % abaixo da média e 5,7 % do desvio padrão. Este déficit hídrico foi observado por Santos et al. (2019), e pode estar associado aos efeitos de um fenômeno de El Niño forte.

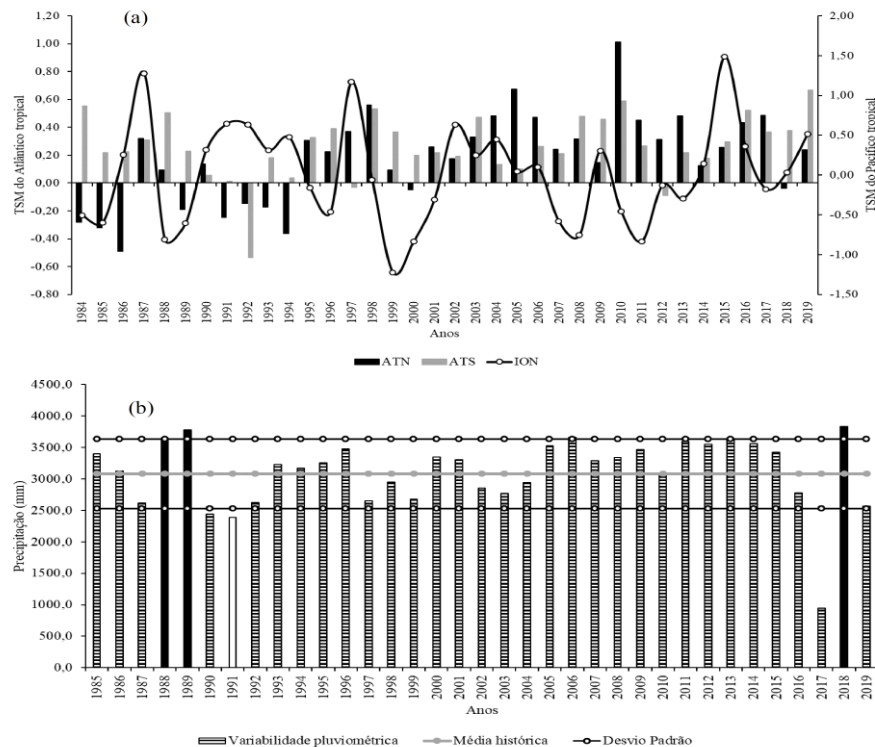


Figura 2. (a) Variabilidade anual dos índices climáticos (1984-2019): oceanos Atlântico (ATN, ATS) e Pacífico (ION). (b) Variabilidade anual pluviométrica (1985-2019): município de Belém-PA. Fonte: NOAA (2021), INMET (2021). Adaptado por autor (2021).

Em 2018 (3.830,4 mm) foi o ano que houve o maior excedente pluvial com 19,5 % acima da média histórica e 5,2 % do desvio padrão, em que possivelmente estão associados a ocorrência do La Niña, além de um Dipolo negativo ocorrido em 1989 (3.785,3 mm) favorecendo ainda mais o aumento das chuvas na região.

A precipitação do município de Santa Isabel do Pará-PA (Fig. 3a) apresentou quatro anos extremos (1985, 1989, 2000, 2018), em que 2018 (1.285,6 mm) ocorreu o menor volume pluvial com 54,4 % abaixo da média histórica e 42,8 % do desvio padrão. O extremo pluviométrico mais elevado foi no ano de 1985 (4.045,2 mm), com cerca de 30,3 % acima da média histórica e 16,2 % do desvio padrão. Nesses anos aconteceram eventos de La Niña e Dipolo negativo em 1989

(3.450,9 mm) contribuindo para o aumento da pluviosidade.

Em Castanhal-PA (Fig. 3b) identificou-se quatro anos extremos (1988, 1989, 1994 e 2012), com destaque para 2012 (1.367,7 mm) com aproximadamente com 42,8 % abaixo da média histórica e 17,0 % do desvio padrão. Entretanto, no ano de 1994 (4.709,4 mm) ocorreu o valor máximo observado, em que atingiu 49,2 % acima da média histórica e 33,3 % do desvio padrão. Vale ressaltar que apesar de 2001 (4.472,5 mm) também se caracterizar como ano extremo, o fenômeno com magnitude forte ocorreu nos anos anteriores (Jorge; Lucena, 2018). Todavia, Sousa et al. (2015) identificaram que os efeitos dos eventos ENOS impactam nas precipitações da estação chuvosa do Estado do Pará nos anos posteriores do seu início.

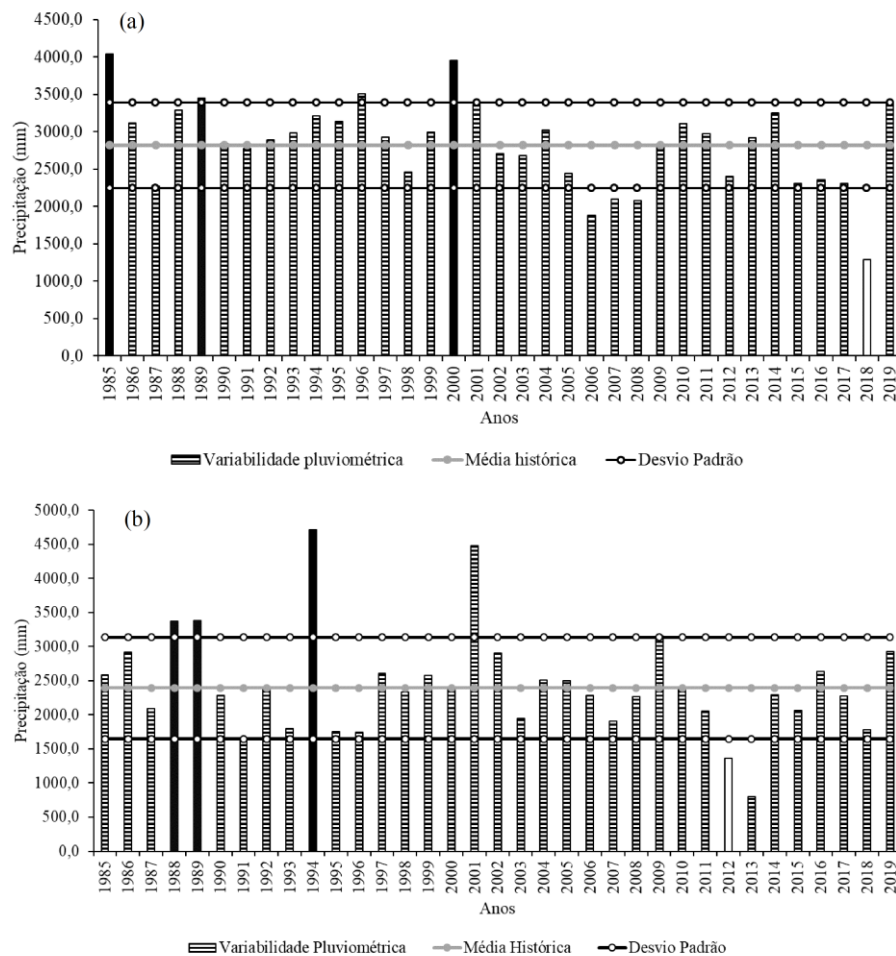


Figura 3. Variabilidade anual pluviométrica (1985-2019): município de (a) Santa Isabel do Pará-PA e (b) Castanhal-PA. Fonte: NOAA (2021), ANA (2021). Adaptado por autor (2021).

O regime pluviométrico em Irituia-PA (Fig. 4a) é marcado como a localidade com a maior ocorrência de anos extremos, oito eventos (1985, 1986, 1988, 1991, 1994, 2010, 2012, 2018). Em 2010 (1.724,4 mm) foi um ano seco e em relação aos padrões médios da região com aproximadamente 29,1 % abaixo da média histórica e 9,6 % do desvio padrão. Isto porque um Dipolo positivo inibiu a formação de nuvens no período chuvoso deste ano e consequentemente diminuiu a pluviosidade. O ano de 1985 (4.194,0 mm), caracterizou-se por apresentar o total pluviométrico mais elevado atingindo em torno de 42,2 % acima da média histórica e 29,4 % do

desvio padrão. Provavelmente um Dipolo negativo associado a um La Niña fraco foram os responsáveis pelo excesso de recarga pluvial.

Na Fig. 4b, há descrito cinco anos extremos (1989, 1997, 2010, 2015, 2018) no município de Ourém-PA. Em 1997 (1.668,4 mm) marcado por 22,6 % abaixo da média histórica e 8,1 % do desvio padrão, sendo o menor volume de chuva ocorrido em decorrência dos efeitos de um El Niño forte que desfavoreceu a convecção do ar e formação de precipitação, onde aliado ao Dipolo positivo, intensificou a diminuição da nebulosidade na região.

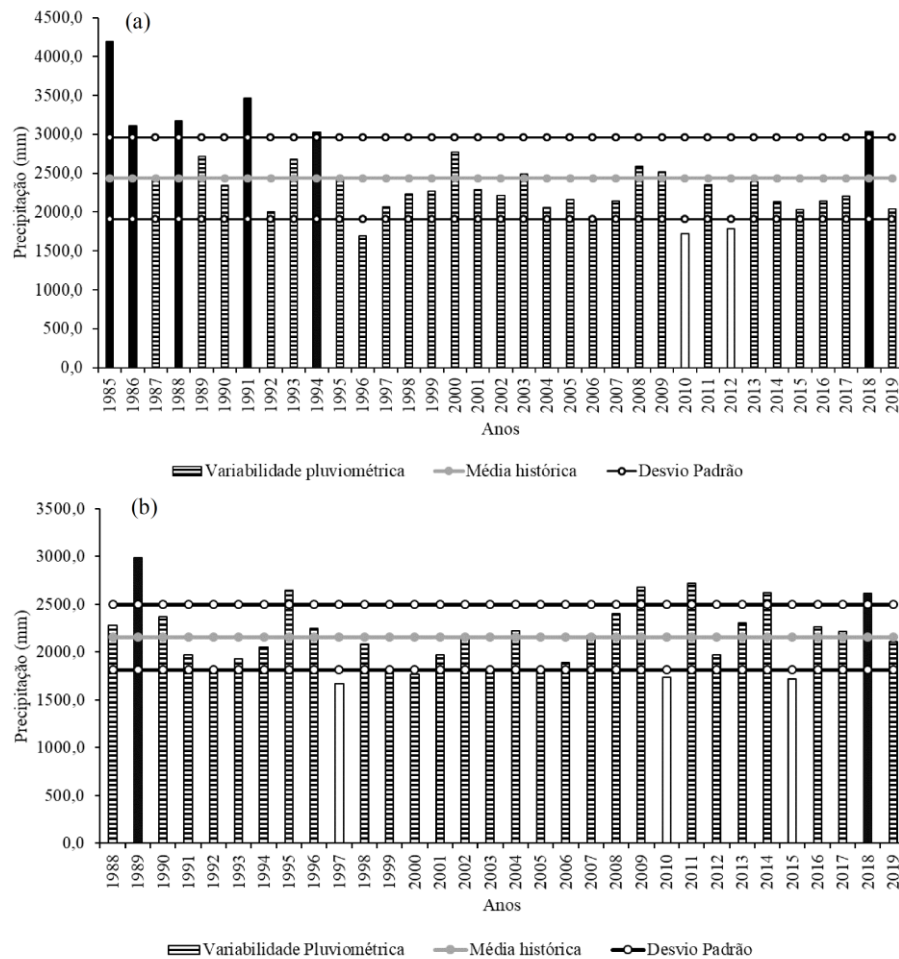


Figura 4. Variabilidade anual pluviométrica *(1985-2019): município de (a) Irituia-PA e (b) Ourém-PA. Fonte: NOAA (2021), ANA (2021). Adaptado por autor (2021).

No ano de 1989 (2.988,9 mm) houve os maiores montantes pluviais com 27,8 % abaixo da média histórica e 16,4 % do desvio padrão. Este excedente hídrico pode estar relacionado ao La Niña promovendo maior convecção do ar e levantamento de água associados ao Dipolo negativo que fortalece a nebulosidade regional.

El Niño e Dipolo Positivo

A Fig. 5 representa a distribuição espacial pluviométrica estimada pelo CHIRPS e GPCC para

os anos (1991, 1997, 2010) que ocorreram El Niño e Dipolo positivo. Observou-se que ambos os estimadores apontaram os menores valores pluviais (1.655,1 mm - 2.003,6 mm) a sudeste da BHG nas proximidades da nascente do rio principal. O Noroeste é marcado como a região de maior potencial pluviométrico (2.273,1 mm – 2.945,6 mm), com exceção em 1991 que o CHIRPS estimou o deslocamento da concentração das chuvas (2.750,8 mm) para Nordeste.

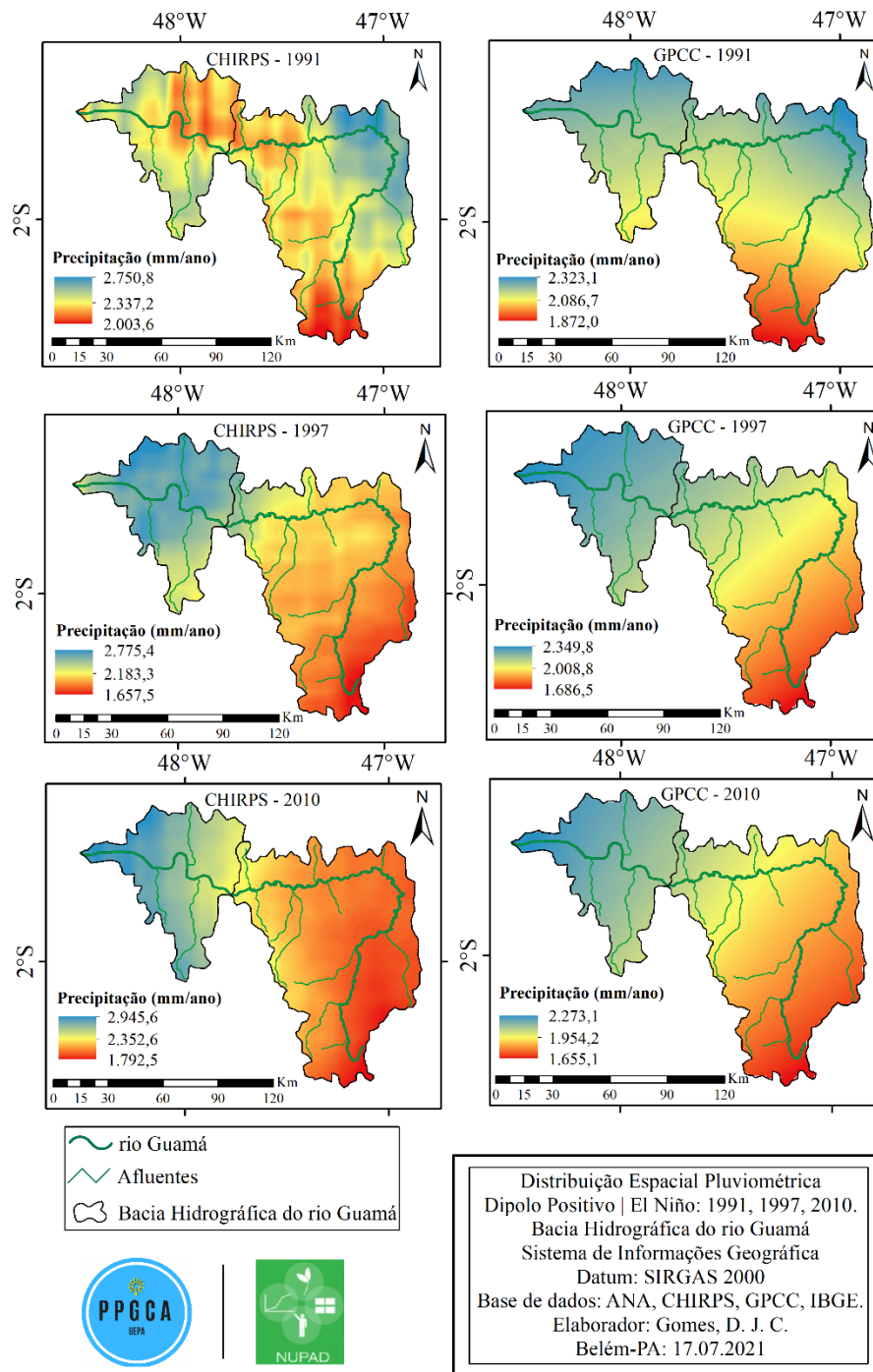


Figura 5. Distribuição espaço-temporal pluviométrica (1991, 1997, 2010): Bacia Hidrográfica do rio Guamá. Fonte: CHIRPS (2021), GPCC (2021). Adaptado por autor (2021).

Nos anos de 2012 e 2015 (Fig. 6), o padrão de distribuição espacial da precipitação não apresentou grandes mudanças, porém em 2015 o CHIRPS estimou os valores mais baixos de chuva (2.226,5 mm) para o Nordeste e o as maiores precipitações (2.981,6 mm) concentrados a Sudoeste.

De acordo com os resultados de Jiménez-Muñoz et al. (2016) o El Niño de 2015 ultrapassou o recorde de aquecimento e seca extrema principalmente na Amazônia oriental. Observações sugerem que o El Niño do Pacífico oriental contribui consideravelmente para a redução das chuvas na Amazônia setentrional (Viegas et al., 2019).

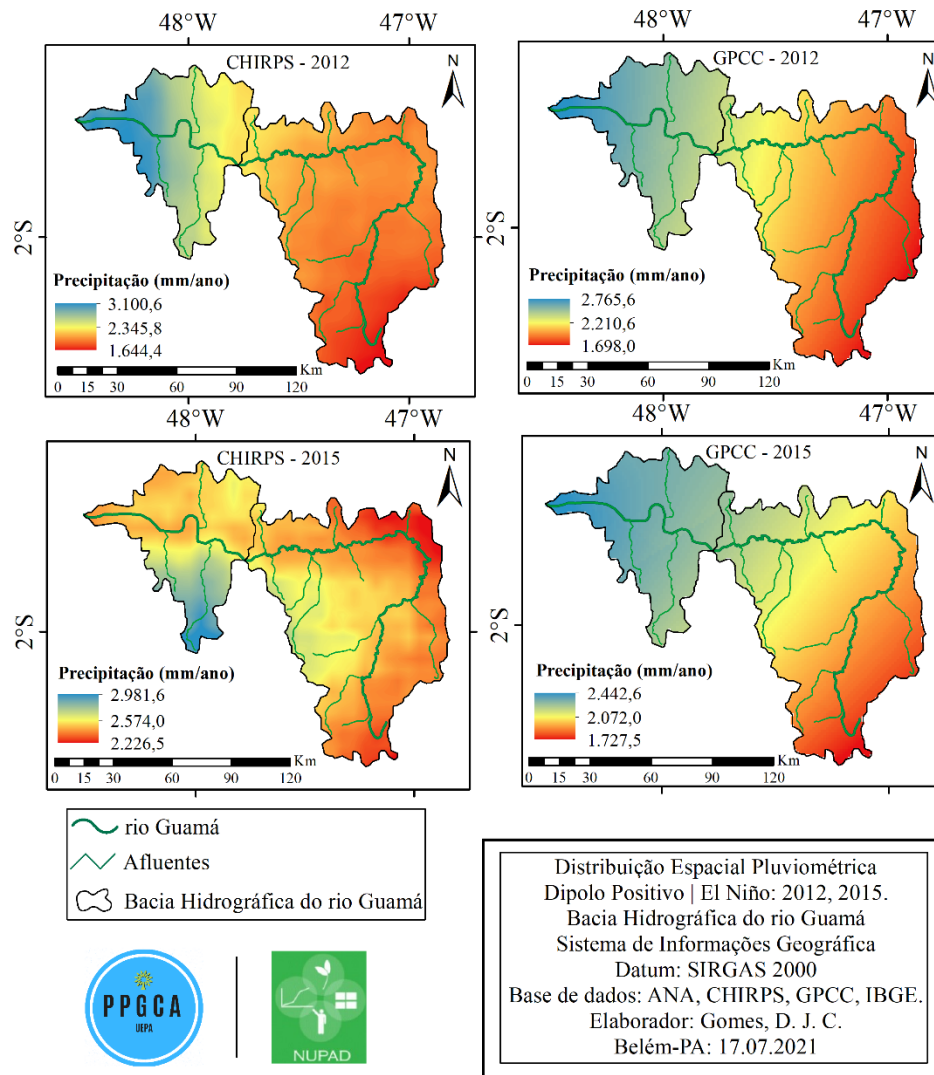


Figura 6. Distribuição espaço-temporal pluviométrica (2012, 2015): Bacia Hidrográfica do rio Guamá. Fonte: CHIRPS (2021), GPCC (2021). Adaptado por autor (2021).

La Niña e Dipolo Negativo

Na Fig. 7 é mostrada a distribuição espacial da precipitação oriunda dos estimadores CHIRPS e GPCC para os anos que houve fenômenos do La Niña e Dipolo negativo. Para tais anos extremos (1985, 1986, 1988) com o abastecimento pluviométrico elevado os menores valores (1.966,0 mm – 2.845,3 mm) de chuva são observados na

parte Sudeste, mesma área da cabeceira do rio Guamá. Os volumes de precipitação mais altos (2.364,8 mm – 3.878,5 mm) se concentram na maior parte ao Norte, com o CHIRPS estimando para o ano de 1988 (3.534,4 mm) grandes volumes de chuva para região Noroeste da BHG.

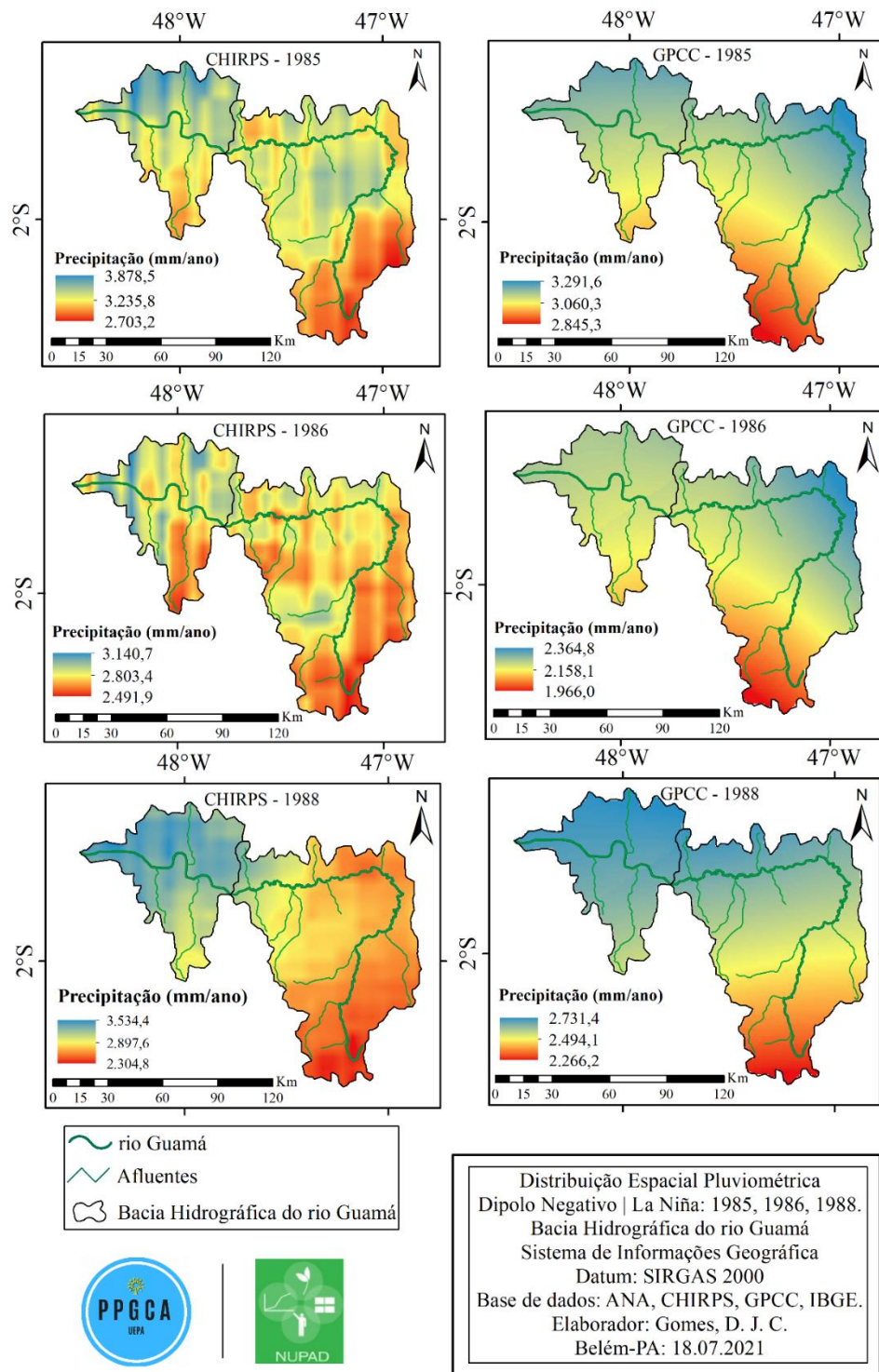


Figura 7. Distribuição espaço-temporal pluviométrica (1985, 1986, 1988): Bacia Hidrográfica do rio Guamá. Fonte: CHIRPS (2021), GPCC (2021). Adaptado por autor (2021).

A Fig. 8 apresenta a precipitação nos anos extremos (1989, 1994, 2000) caracterizada com uma distribuição espacial mais regular. E no setor Sudeste da BHG também é identificado a padronização da pluviosidade inferior (2.189,3 mm – 2.630,1 mm). Em comparação aos anos extremos (Fig. 7), observa-se o deslocamento espacial do

maior montante de precipitação (2.805,8 mm – 3.643,3 mm) para a região Noroeste.

Descobertas recentes apontam que a alta variabilidade climática como a ocorrência de episódios de seca extrema e chuvas intensas de modo sinérgico pode causar degradações ambientais em bacias hidrográficas (Qiu et al.,

2021). Os mesmos pesquisadores ainda alertam que tal cenário pode comprometer a segurança hídrica.

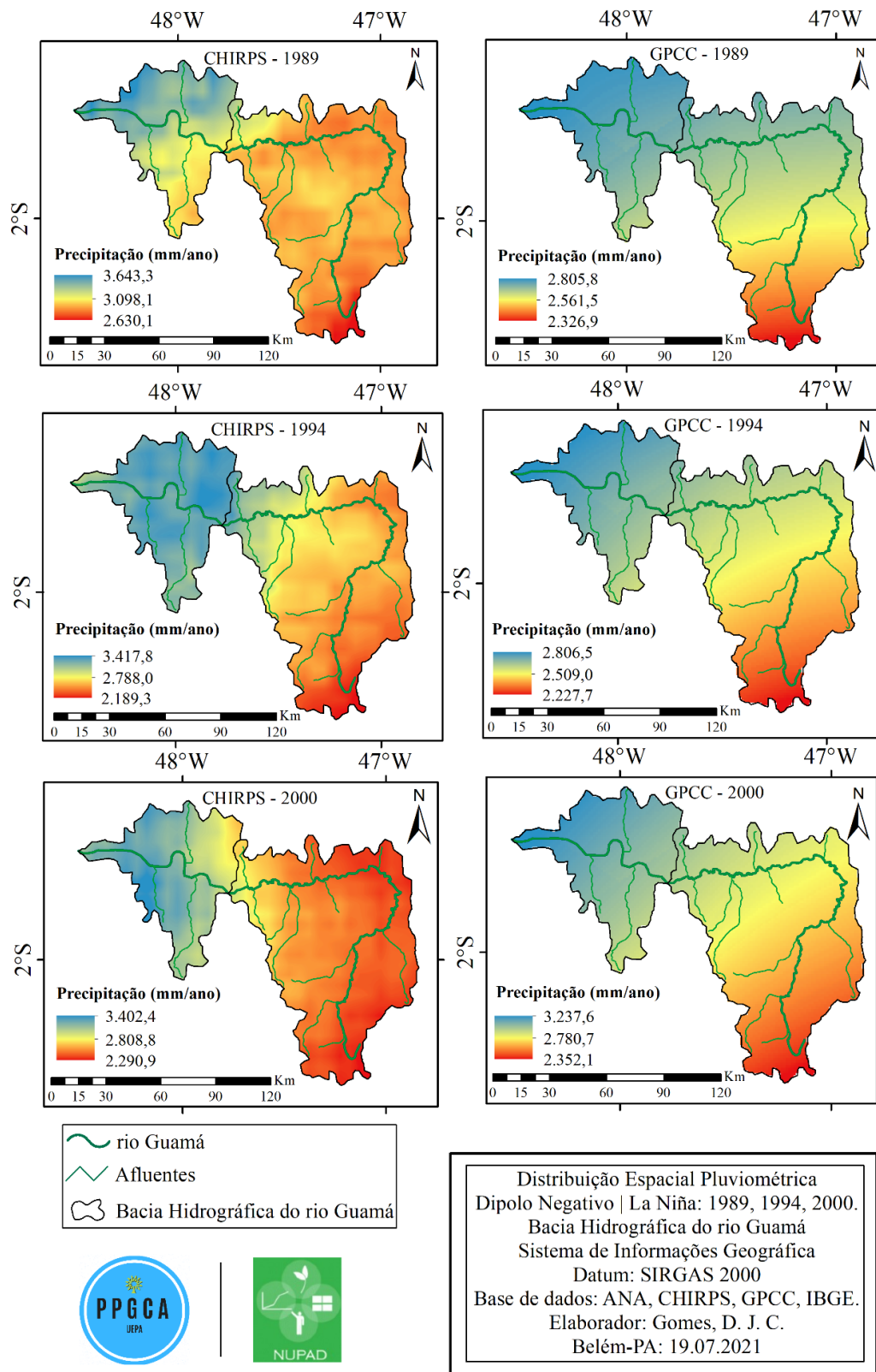


Figura 8. Distribuição espaço-temporal pluviométrica (1989, 1994, 2000): Bacia Hidrográfica do rio Guamá. Fonte: CHIRPS (2021), GPCC (2021). Adaptado por autor (2021).

Na Fig. 9 observa-se a variabilidade espacial da chuva estimada pelo CHIRPS e GPCC

no ano de 2018 e a climatologia da BHG. Em 2018 a área da nascente do rio Guamá permanece

marcada com baixos totais pluviométricos (2.363,9 mm – 2.671,7 mm). Os maiores volumes de precipitação foram observados também a Noroeste da BHG, ressaltando que o CHIRPS estimou uma variação espacial maior nesta região.

A climatologia estimada da BHG indica a distribuição espacial padrão nas últimas décadas, com o CHIRPS apresentando em torno de 200 mm a mais em relação ao GPCC. A região Sudeste possui os menores valores (2.062,3 mm - 2.204,7 mm), enquanto o Noroeste se caracteriza como o

setor de maior recarga pluvial (2.710,9 mm – 2.951,2 mm).

Silva et al. (2020) analisaram o paleoclima na Amazônia e observaram que no setor leste (situada a BHG) há tendências de diminuição dos anos chuvosos últimas décadas. Contudo, relatos de Santos et al. (2019) contrapõem afirmando que há aumento de eventos de La Niña e precipitação (anual e sazonal) na Região Metropolitana de Belém.

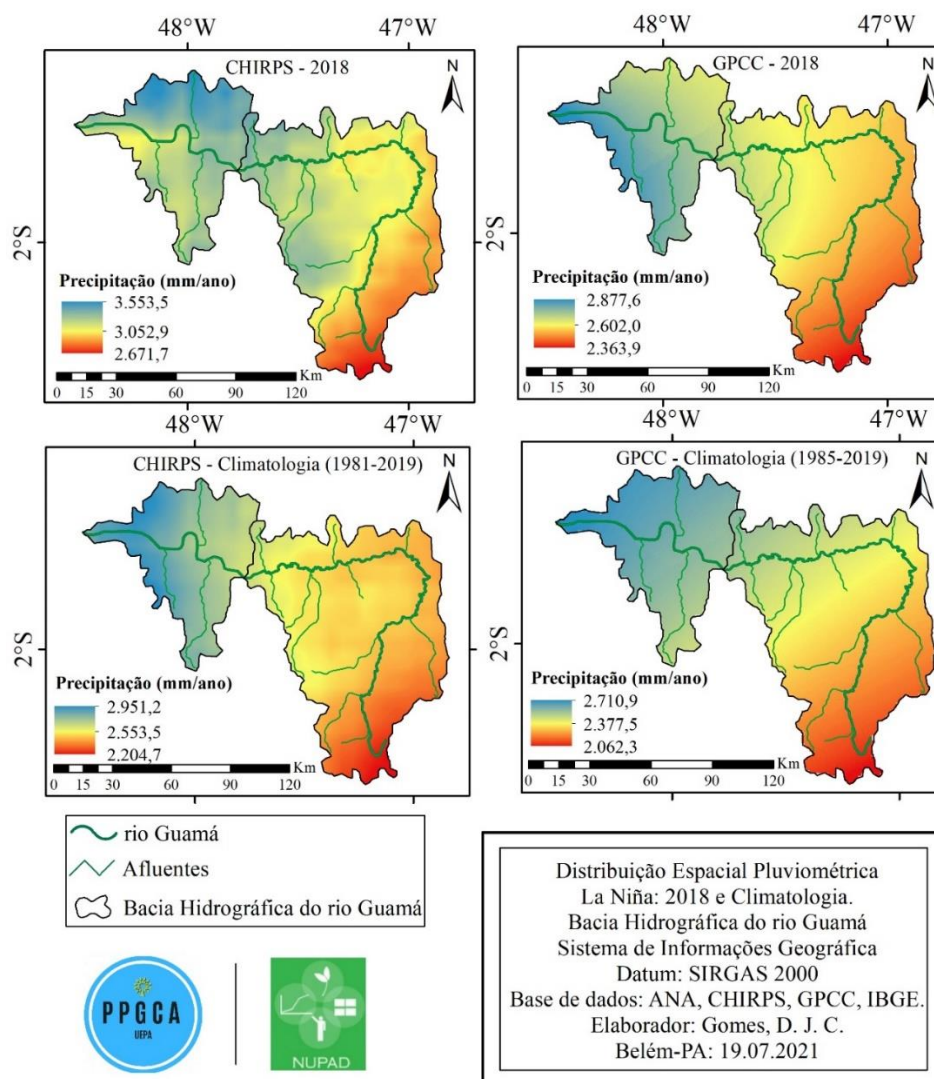


Figura 9. Distribuição espaço-temporal pluviométrica (2018 e climatologia): Bacia Hidrográfica do rio Guamá. Fonte: CHIRPS (2021), GPCC (2021). Adaptado por autor (2021).

Conclusão

Os índices climáticos apontaram com eficiência a formação de fenômenos da interação oceano-atmosfera, com a maioria das anomalias observadas indicando os extremos climáticos.

A bacia hidrográfica do rio Guamá apresentou padrões climatológicos com altos valores de precipitação, contabilizando 17 (6)

eventos de chuvas fortes (estiagem) com máximas (mínimas) acima (abaixo) do desvio padrão positivo (negativo) associados aos mecanismos climáticos.

Os cenários de espacialização dos anos extremos apresentaram tendências de superestimação (subestimação) dos dados CHIRPS

(GPCC) em relação aos valores medidos e a climatologia. Isto foi confirmado pela estatística que mostrou valores muito subestimados do GPCC para Belém e Castanhal, sendo este último apresentando superestimação muito elevada. O que pode indicar maiores erros de estimação pluviométrica dos estimadores para a região de Castanhal.

Mas, no geral representaram de forma satisfatória com destaque para o CHIRPS que

apresentou uma maior variabilidade espacial em alguns anos extremos. Isto levanta questionamentos do quanto os eventos ENOS e o Dipolo do Atlântico provocam maior dificuldade na estimação de chuvas em áreas com menor número de estações pluviométricas ou até a ausência, pois mais investigações poderiam auxiliar na melhoria e atualização dos conjuntos de dados estimadores de precipitação.

Referências

- Agência Nacional das Águas (ANA). Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos. Disponível em: <<http://www.snirh.gov.br/hidroweb/publico/apresentacao.jsf>>. Acessado: 01/07/2021.
- Almeida, G. G. L., Paiva, A. L. R., Oliveira, L. M. M., Leonardo, H. R. A., 2020. Análise de índices climáticos para a avaliação do efeito de mudanças climáticas. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 13 (1), 1-17.
- Assis, J. M. O., Souza, W. M. S., Koch, H., Sobral, M. C. M., 2018. Influência dos oceanos Pacífico e Atlântico tropicais sobre os índices climáticos da precipitação na bacia do submédio São Francisco. *Revista Brasileira de Climatologia*, 23, 411-433.
- Becker, A., Finger, P., Meyer-Christoffer, A., Rudolf, B., Schamm, K., Schneider, U., Ziese, M., 2013. A description of the global land-surface precipitation data products of the global precipitation climatology centre with sample applications including centennial (trend) analyses from 1901-present. *Earth System Sci. Data*, 5, 71-99.
- Bonini, I., Rodrigues, C., Dallacort, R., Marimon Junior, B. H., Carvalho, M. A. C., 2014. Rainfall and deforestation in the municipality of Colíder, Southern Amazon. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 29 (4), 483-493.
- Boulton, C. A., Lenton, T. M., Boers, N., 2022. Pronounced loss of Amazon rainforest resilience since the early 2000s. *Nature Climate Change*, 12, 271-278.
- Brubacher, J. P., Oliveira, G. G., Guasselli, L. A., 2020. Preenchimento de falhas e espacialização de dados pluviométricos: desafios e perspectivas. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 35 (4), 615-629.
- Cavalcante, R. B. L., Ferreira, D. B. S., Pontes, P. R. M., Tedeschi, R. G., Costa, C. P. W., Souza, E. B., 2020. Evaluation of extreme rainfall indices from CHIRPS precipitation estimates over the Brazilian Amazonia. *Atmospheric Research*, 238, 1-12.
- CHIRPS. *Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Stations*. Climate Hazard Center – UC Santa Bárbara. Disponível: https://data.chc.ucsb.edu/products/CHIRPS-2.0/global_annual/tifs/. Acesso: 11/12/2021.
- Costa, J., Pereira, G., Siqueira, M. E., Cardozo, F., Silva, V. V., 2019. Validação dos dados de precipitação estimados pelo CHIRPS para o Brasil. *Revista Brasileira de Climatologia*, 24 (15), 228-243.
- Damé, R. C. F., Teixeira-Gandra, F. A., Villela, F. A., Santos, J. P., Winkler, A. S., 2014. Analysis of the relationship intensity, duration, frequency of disaggregated daily rainfall in southern Rio Grande do Sul, Brazil. *Revista de Engenharia Agrícola*, 34 (4), 600-670.
- Dias, G. F. M., Gomes, D. J. C., Serrão, E. A. O., Lima, A. M. M., Miranda, S. B. A., Silva Junior, J. A., Sousa, A. M. L., 2020. Associação entre eventos de ENOS e distribuição espaço-temporal da precipitação na bacia hidrográfica do rio Capim (MA-PA). *Revista Brasileira de Climatologia*, 26 (16), 521 – 540.
- Espinoza, J., Marengo, J. A., Schongart, J., Jimenez, J. C., 2022. The new historical flood of 2021 in the Amazon river compared to major floods of the 21st century: atmospheric features in the context of the intensification of floods. *Weather and Climate Extremes*, 35, 1-12.
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, L., Hoell, A., Michaelsen, J., 2015. The climate hazards infrared precipitation with stations – a new environmental record for monitoring extremes. *Scientific data*, 2 (150066).
- Gomes, D. J. C., Lima, A. M. M., Serrão, E. A. O., Rodrigues, H. J. B., 2021a. Suscetibilidade à erosão hídrica do solo: bacia hidrográfica do rio Capim (MA-PA). *Ciência & Natura*, 43 (55), 1-22.
- Gomes, D. J. C., Silva, L. P., Ferreira, N. S., Lobato, R. R. C., Serrão, E. A. O., Lima, A. M. M., 2021b. Impactos climáticos na erosão

- hídrica do solo para a Amazônia ocidental. *Revista Brasileira de Climatologia*, 28, 242-265.
- Gomes, D. J. C., Soares, C. J. C., Lima, I. C. P., Ferreira, N. S., Lima, A. M. M., 2021c. Oscilações hidroclimáticas associadas às condições ambientais: bacia hidrográfica do rio Canoas-SC. *Ciência & Natura*, 43 (62) 1-33.
- Goovaerts, P., 2000. Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall. *Journal of Hydrology*, 228, 113-129.
- GPCC. Global Precipitation Climatology Center. Acessado em: 7/07/2021. Disponível em: <https://kunden.dwd.de/GPCC/Visualizer>.
- Haile, M. G., Wossen, T., Tesfaye, K., Braun, J., 2017. Impact of climate change, weather extremes, and price risk on global food supply. *Economics of Disasters and Climate Change*, 1, 55-75.
- Jiménez-Muñoz, J. C., Mattar, C., Barichivich, J., Santamaría-Artigas, A., Takahashi, K., Malhi, Y., Sobrino, J. A., Schrier, G., 2016. Record-breaking warming and extreme drought in the Amazon rainforest during the course of El Niño 2015-2016. *Scientific Report*, 6 (33130), 1-6.
- Jorge, R. L. O., Lucena, D. B., 2018. Eventos extremos anuais de precipitação em Mauriti-CE. *Ciência & Natura*, 40 (65), 1-10.
- Kubota, N. A., Lima, A. M. M., Rocha, N. C. V., Lima, I. F., 2020. Hidrogeomorfologia da bacia hidrográfica do rio Guamá – Amazônia oriental – Brasil. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 21 (4), 759-782.
- Leite-Filho, A. T., Soares-Filho, B. S., Davis, J. L., Abrahão, G. M., 2021. Deforestation reduces rainfall and agricultural revenues in the Brazilian Amazon. *Nature Communications*, 12, (2591), 1-7.
- Lewis, S. L., Brando, P. M., Phillipis, O. L., Van Der Heijden, G. M., Nepstad, D., 2011. The 2010 Amazon drought. *Science*, 331 (6017), 554-554.
- Marengo, J. A., Tomasella, J., Soares, W. R., Alves, L. M., Nobre, C. A., 2012. Extreme climatic events in the Amazon basin climatological and hydrological context of recent floods. *Theoretical and Applied Climatology*, 107 (1-2), 73-85.
- Mello, Y. R., Kohls, W., Oliveira, T. M. N., 2017. Uso de diferentes métodos para preenchimento de falhas em estações pluviométricas. *Boletim Geográfico*, 35 (1), 112-121.
- Melo, V. S., Lima, L. M., 2021. Caracterização da chuva da microrregião de Catolé do Rocha no Estado da Paraíba em estatística aplicada. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 36 (1), 97-106.
- Moura, M. M., Santos, A. R., Pezzopane, J. E. M., Alexandre, R. S., Silva, S. F., Pimental, S. M., Andrade, M. S. S., Silva, F. G. R., Branco, E. R. F., Moreira, T. R., Silva, R. G., Carvalho, J. R., 2019. Relation of El Niño and La Niña phenomena to precipitation, evapotranspiration and temperature in the Amazon basin. *Science of The Total Environment*, 651, 1639-1651.
- Mu, Y., Biggs, T., Shen, S. S. P., 2021. 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*, 261, 1-10.
- NOAA. National Oceanic Atmospheric and Administration. Disponível em: <<https://psl.noaa.gov/data/climateindices/list/>>. Acessado: 2/07/2021.
- Paca, V. H. M., Espinoza-Dávalos, G. E., Moreira, D. M., Comair, G., 2020. Variability of trends in precipitation across the Amazon river basin determined from the CHIRPS precipitation product and from station records. *Water*, 12 (5), 1-22.
- Passow, M., 2010. TRMM - Tropical Rainfall Measuring Mission: Bringing remote sensing of precipitation into your classroom. *Terra e Didática*, 6 (1), 3-8.
- Pedreira Junior, A. L., Querino, C. A. S., Biudes, M. S., Machado, N. G., Santos, L. O. F., Ivo, I. O., 2020. Influence of El Niño and La Niña phenomena on seasonality of the relative frequency of rainfall in Southern Amazonas mesoregion. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 25, 1-8.
- Pisani Junior, R., Castro, M. C. A. A., Costa, A. A., 2018. Desenvolvimento de correlação para estimativa da taxa de geração *per capita* de resíduos sólidos urbanos no estado de São Paulo: influências da população, renda *per capita* e consumo de energia elétrica. *Revista de Engenharia Sanitária Ambiental*, 23 (2) 415-424.
- Qiu, J., Shen, Z., Leng, G., Wei, G., 2021. Synergistic effect of drought and rainfall events of diferente patterns on watershed systems. *Scientific Reports*, 11 (18957), 1-18.
- Ramires, J. Z. S., Mello-Théry, N. A., 2018. Uso e ocupação do solo em São Paulo, alterações climáticas e os riscos ambientais contemporâneos. *Confins [on-line]*, 34.
- Rata, M., Douaoui, A., Larid, M., Douaïk, A., 2020. Comparison of geostatistical interpolation methods to map annual rainfall

- in the chéiff watershed, Algeria. *Theoretical and Applied Climatology*, 141, 1009-1024.
- Reboita, M. S., Oliveira, K. R., Corrêa, P. Y. C., Rodrigues, R., 2021. Influência dos diferentes tipos do fenômeno El Niño na precipitação da América do Sul. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 14 (2), 729-742.
- Rocha, N. C. V., Lima, A. M. M., 2020. A sustentabilidade hídrica na bacia do rio Guamá, Amazônia oriental/Brasil. *Sociedade & Natureza*, 32, 141-160.
- Rodrigues, B. D., Coutinho, M. D. L., Sakamoto, M. S., Jacinto, L. V., 2021. Uma análise sobre as chuvas no Ceára baseada nos eventos de El Niño, La Niña e no Dipolo do Servain durante a estação chuvosa. *Revista Brasileira de Climatologia*, 28, 507-519.
- Ruezzene, C. B., Miranda, R. B., Tech, A. R. B., Mauad, F. F., 2021. Preenchimento de falhas em dados de precipitação através de métodos tradicionais e por inteligência artificial. *Revista Brasileira de Climatologia*, 29, 177-204.
- Ryu, S., Song, J. J., Kim, Y., Jung, S., Do, Y., Lee, G., 2021. Spatial interpolation of gauge measured rainfall using compressed sensing. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 57, 331-345.
- Santos, J. S., Rocha, E. J. P., Souza Junior, J. A., Santos, J. S., Santos, F. A. A., 2019. Climatologia da Amazônia Oriental: uso de prognósticos climáticos como ferramenta de prevenção de ameaças naturais. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 12 (5), 1853-1871.
- Serrão, E. A. O., Wanzeler, R. T. S., Santos, C. A.; Gonçalves, L. J. M., Lima, A. M. M., 2016. Avaliação estatística entre as estimativas de precipitação da constelação GPM com satélite TRMM: uma análise a bacia hidrográfica do rio Solimões. *Revista Brasileira de Climatologia*, 18, (12), 256 – 275.
- Silva, E. M., Queiroz, F. C. M., Alves, J. M. B., 2021. Climatologia e Mudanças climáticas: avaliação da produção bibliográfica no período de 2009 a 2019. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 36 (3), 551-562.
- Silva, M. J. G., Querino, C. A. S., Santos Neto, L. A., Machado, N. G., Militão, J. S., Biudes, M. S., 2018. Efeito da ocupação do solo sobre o clima de Porto Velho, Rondônia, Brasil. *RA'EGA*, 43, 232-251.
- Silva, N. S., Alves, J. M. B., Silva, E. M., Lima, R. R., 2020. Eventos paleoclimáticos de El Niños, La Niñas e neutros no Pacífico tropical e de precipitação no Sudoeste e Leste da Amazônia. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 35 (3), 477-484.
- Silva Neto, V. L., Viola, M. R., Mello, C. R., Alves, M. V. G., Silva, D. D., Pereira, S. B., 2020. Mapeamento de chuvas intensas para o Estado do Tocantins. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 35 (1), 1-11.
- Sousa, A. M. L., Rocha, E. J. P., Vitorino, M. I., Souza, P. J. O. P., Botelho, M. N., 2015. Variabilidade espaço-temporal da precipitação na Amazônia durante eventos ENOS. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 8 (1), 13-24.
- Souza, E. B., Kayano, M. T., Ambrizzi, T., 2005. Intraseasonal and submonthly variability over the eastern Amazon and northeast Brazil during the autumn rainy season. *Theoretical and Applied Climatology*, 81 (3/4), 177-191.
- Souza Neto, P. F., Silva, D. F., Almeida, H. R. R. C., 2021. Análise da variabilidade climática dos oceanos Atlântico e Pacífico. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 14 (4), 1861-1879.
- Staal, A., Flores, B. M., Aguiar, A. P. D., Bosmans, J. H. C., Fetzner, I., Tuinenburg, O. A., 2020. Feedback between drought and deforestation in the Amazon. *Environmental Research Letters*, 15 (4), 1-9.
- Towner, J., Cloke, H. L., Lavado, W., Santini, W., Bazo, J., Perez, E. C., Stephens, E. M., 2020. Attribution of Amazon floods to modes of climate variability: a review. *Meteorological Applications*, 27 (5), 1-36.
- Viegas, J., Andreoli, R. V., Kayano, M. T., Candido, L. A., Souza, R. A. F., Hall, D. H., Souza, A. C., Garcia, S. R., Temoteo, G. G., Valentin, W. I. D., 2019. Caracterização dos diferentes tipos de El Niño e seus impactos na América do Sul a partir de dados observados e modelados. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 34 (1), 43-67.
- Zákhia, E. M. S., Alvarenga, L. A., Tomasella, J., Martins, M. A., Santos, A. C. N., Melo, P. A., 2021. Impactos das mudanças climáticas em uma bacia hidrográfica no Sul do Estado de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 36 (4), 667-681.
- Yang, X., Xie, X., Liu, D. L., Ji, F., Wang, L., 2015. Spatial interpolation of daily rainfall data for local climate impact assessment over greater Sydney region. *Advances in Meteorology*, 2015.