Revista Brasileira de Climatologia
Brazilian Journal of Climatology
OPEN ACCESS
ISSN 2237-8642

ANÁLISE DO INDICE DE ANOMALIA DE CHUVA (IAC) E A INFLUÊNCIA DO FENÔMENO EL NIÑO - OSCILAÇÃO SUL (ENOS) NA FLORESTA NACIONAL DE CAXIUANÃ

Analysis of the Rain Anomaly Index (RAI) and influence of the El Niño-Southern Oscilation phenomenon in the Caxiuanã National Forest.

Analisis del Índice de Anomalia de Precipitaión (AIP) e influecia de El Niño Oscilación del Sur en el Bosque Nacional de Caxiuanã

Ana Caroline Sousa Lopes da Silva
Museu Paraense Emilio Goeldi – Programa de Capacitação Profissional
caroolinekeyes@gmail.com

José Francisco Berrêdo Reis da Silva
Museu Paraense Emilio Goeldi
berredo@museu-goeldi.br

Carlos Alberto Dias Pinto
Universidade Federal do Pará
carlosdias87@gmail.com

Antônio Carlos Lola da Costa
Universidade Federal do Pará
lola@ufpa.br

Marcelo Henrique Phavac de Sousa
Museu Paraense Emilio Goeldi
marcelophavac@yahoo.com.br

Pablo Sanchez-Martinez
Universidade of Edinburgh
Pablo.sanchez@ed.ac.uk

Resumo: As mudanças climáticas assumem cada vez mais importância nos processos naturais na Amazônia. Dessa forma, conhecer a quantidade, intensidade e a distribuição espacial da precipitação pluvial contribui para a gestão e o planejamento territorial da área. Uma das formas de se estudar a precipitação pluvial de determinada região é através de Índices de Anomalia de Chuva (IAC). O presente trabalho tem como objetivo analisar a variabilidade das precipitações anuais na floresta nacional de Caxiuanã, evidenciando os anos de ocorrência dos fenômenos El Niño de oscilação sul (ENOS). Os dados foram obtidos pelos projetos LBA e ESECAFLOR localizados na Estação Cientifica Ferreira Pena, para um período de 43 anos. Os cálculos do IAC foram realizados com base nas médias mensais e médias dos 10 anos de máximas e mínimas precipitações. Nas ocorrências de El Niño extremos, o período considerado seco da região se agravou, enquanto nas ocorrências de La Niña moderados, o período chuvoso variou diferente do normal. Com o emprego do IAC, foi possível visualizar e analisar esta influência de Enos e que a Oscilação Decadal do Pacifico (ODP) tem compatibilidade com o índice quando se analisa a variação da precipitação da região.
Palavras-chave: Hidrologia. Precipitação. Climatologia.

Abstract: Climate change is increasingly important in the natural processes of the Amazon. Thus, understanding the quantity, intensity, and spatial distribution of rainfall contributes to the management and territorial planning of the area. One way to study the rainfall of a specific region is through the Rainfall Anomaly Index (RAI). This study aims to analyse the variability of annual precipitation in the Caxiuanã National Forest, highlighting the years of occurrence of El Niño Southern Oscillation (ENSO) phenomena. The data were obtained from the LBA and ESECAFLOR projects located at the Ferreira Pena Scientific Station, covering a period of 43 years. RAI calculations were based on monthly averages and the averages of the 10 years with the highest and lowest precipitation. During extreme El Niño events, the dry period in the region was drier, while during moderate La Niña events, the rainy period varied differently than normal. Using the RAI, it was possible to visualize and analyse the influence of the ENOS, confirming that the index is compatible with the Pacific Decadal Oscillation (PDO) when analysing the precipitation variation in the region.
Keywords: Hydrology. Precipitation. Climatology.

Resumen: Los cambios climáticos adquieren cada vez más importancia en los procesos naturales en la Amazonía. Por tanto, conocer la cantidad, intensidad y distribución espacial de la precipitación pluvial contribuye a la gestión y planificación territorial del territorio. Una de las formas de estudiar la precipitación pluvial de una región determinada es a través de los Índices de Anomalía de pluviométrica (IAP). El presente trabajo tiene como objetivo analizar la variabilidad de las precipitaciones anuales en la Floresta Nacional de Caxiuanã, destacando los años de ocurrencia de los fenómenos El Niño-Oscilación del Sur (ENOS). Los datos fueron obtenidos a través de los proyectos LBA y ESECAFLOR, ubicados en la Estación Científica Ferreira Pena, durante un período de 43 años. Los cálculos del IAP se realizaron con base a los promedios mensuales y los promedios de las máximas y mínimas precipitaciones durante 10 años. En las ocurrencias de El Niño extremos, el período considerado seco de la región se agravó, mientras que en las ocurrencias de La Niña moderados, el período lluvioso presentó variaciones distintas a lo normal. Con el empleo del IAP, fue posible visualizar y analizar la influencia de ENOS comprobando que la Oscilación Decadal del Pacífico (ODP) es compatible con el índice al analizar la variación de la precipitación en la región.
Palabras clave: Hidrología. Precipitación. Climatología.

Submetido em: 27/11/2024
Aceito para publicação em: 13/02/2025
Publicado em: 18/03/2025

1. INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas estão ocorrendo em uma intensidade cada vez maior e o interesse no estudo dessa variabilidade se faz cada vez mais importante para um melhor entendimentos dos processos climáticos naturais. Entender essa dinâmica traria luz a várias respostas, inclusive quais os impactos das atividades humanas nesse fenômeno. A região Amazônica, como um ponto central na climatologia mundial, se vê diretamente afetada por essas mudanças e os impactos são percebidos na intensidade e duração de secas na região (Seneviratne et al., 2012; Gloor et al., 2015).

Ao longo do tempo, a região Amazônica foi caracterizada por suas elevadas temperaturas do ar e quantidades de precipitações sazonais e anuais. O regime pluviométrico da região não é homogêneo, apresentando alta variabilidade espacial e temporal condicionadas à interação de diferentes mecanismos ou sistemas atmosféricos. A precipitação na Amazônia está ligada fortemente com os padrões oceano-atmosférico de grande escala, que interferem de maneira significativa na estação chuvosa da região (Philander, 1990; Halpert e Ropelewski, 1992; Madden e Julian, 1994).

A Amazônia abriga a maior bacia hidrográfica do globo, sendo que a variabilidade fluviométrica (períodos de enchente e vazante) é determinada pela variabilidade da precipitação pluviométrica. Em outras palavras, a chuva é a principal entrada de água no sistema hidrológico da Amazônia (Santos, 2008). Assim, a caracterização da precipitação, além de ser essencial à estimativa de um balanço hídrico, é variável fundamental no planejamento e zoneamento territorial, na gestão dos recursos hídricos, nos serviços públicos de saneamento básico e abastecimento de água, no setor elétrico e no agronegócio, dentre outros (Rocha et al, 2021).

Santos (2008) também observa que a maioria das cidades amazônicas se situa às margens dos rios, sendo que a ocorrência de secas meteorológicas/hidrológicas com eventos de vazante intensa nos rios proporciona grandes transtornos nas atividades de transporte fluvial, pesca e produção agrícola (agricultura familiar), com sérios impactos sociais e econômicos.

Nos anos de 2005 e 2010 as vazões do rio Amazonas e seus tributários foram reduzidas a valores mínimos, isso afetou diretamente diversos municípios ribeirinhos,

provocando carência de água potável e alimentos (Marengo et al., 2008; Marengo et al., 2011a). Já nos anos de 2009 e 2012, estes mesmos rios indicaram níveis máximos dos registros iniciados em 1903, desalojando milhares de pessoas em toda a região (Marengo et al., 2011b; Espinoza et al., 2013).

A região também apresenta regime de estiagem ou de seca, caracterizados pela ocorrência de deficiência pluviométrica, tanto durante os meses mais chuvosos (de dezembro a maio), como principalmente durante os meses menos chuvosos (de Junho a novembro) (Souza; Ambrizzi, 2003). Este cenário tem uma associação com o aquecimento da temperatura na superfície do mar do Oceano Pacífico Tropical e/ou do Oceano Atlântico Norte Tropical, fenômeno denominado de El Niño Oscilação Sul (ENOS) (Marengo e Espinoza, 2016; Aragão *et al*., 2018).

O ENOS refere-se às situações nas quais as temperaturas do oceano Pacífico Equatorial estão mais elevadas (El Niño) ou abaixo (La Niña) da média normal histórica. Tal fenômeno acarreta efeitos globais nas temperaturas e acumulados de precipitação globais. A caracterização do ENOS é feita através do cálculo de índices, como o Índice Oceânico Niño (Oceanic Niño Index – ONI) definido pela média móvel trimestral da anomalia de temperatura da superfície do mar para a região do Niño 3.4 (localizada na porção central do Pacífico Equatorial), por no mínimo, cinco períodos de três meses consecutivos com valores de anomalias superiores a 0,5°C para eventos de El Niño, e inferiores a -0,5°C para eventos de La Niña (INPE-CPTEC, 2024).

Os extremos desse fenômeno são, em grande parte, responsáveis pelas variações interanuais do clima tropical, como na região amazônica que os efeitos foram detectados principalmente para a precipitação. Estudos já detectaram padrões de anomalia de precipitação na região relacionados ao ENOS, com condições de seca ou úmidas durante os meses de junho a março (Andreolli, 2005).

Em 2005, período de transição de La Niña para El Niño, os eventos de seca e de cheia registrados na Amazônia provocaram impactos severos na população ribeirinha, como por exemplo, inundação e as enchentes (Marengo, 2008; Marengo et al., 2011b). Isto proporciona grandes transtornos nas atividades de transporte fluvial, na pesca e na produção agrícola (agricultura familiar), com sérios impactos sociais e econômicos (Santos, 2008).

Segundo Marengo (2007), os eventos extremos, como a seca do ano de 2005 registrada no Oeste e Sudoeste da Amazônia, num cenário futuro de mudança climática (induzido pelas altas emissões globais de gases do efeito estufa na atmosfera) irão se tornar mais frequentes.

Outro padrão Oceano-Atmosférico que interfere na região é a Oscilação Decadal do Pacífico (ODP), que são padrões de anomalias na temperatura, pressão e vento no Oceano Pacífico, semelhantes aos de ENOS, menos confinados na região equatorial e se expandindo pelo Pacífico Norte Extratropical. Sua fase quente apresenta um sistema de baixa pressão profundo, com temperaturas da superfície do oceano mais quente ao longo da costa da América do Sul. Já a fase fria apresenta padrões invertidos de pressão e temperatura. Para Andreolli (2005) estes dois fenômenos podem ter efeitos combinados nas distribuições anômalas de precipitação, agindo fortemente quando estão na mesma fase e fracamente em fases opostas.

Dessa forma, é possível considerar que a variabilidade climática é a variação “natural” das condições climáticas, incluindo os extremos, fugindo da habitualidade. Sendo assim, torna-se fundamental compreender os modos e fenômenos que influenciam no regime de precipitações tanto anuais como sazonais (Oliveira et al., 2021).

Entender o ritmo habitual da precipitação na Amazônia, permite-nos observar sua distribuição ao longo do tempo em termos de sua variabilidade assim como as excepcionalidades (eventos de seca ou excessos pluviométricos que fogem do padrão normal de distribuição da chuva para a área) analisando as séries históricas de dados.

Com isso, se faz necessário organizar um banco de dados, com uma série de registros anuais, onde poderia ser observada a variabilidade do comportamento climático de uma região, principalmente em relação às chuvas intensas (Clarke e Silva, 2004). O uso do IAC (Indice de Anomalia de Chuva) requer apenas dados de precipitação, facilitando uma possível correção dos dados, e o acesso a uma série de dados longa e representativa facilita possíveis correções nesses dados.

Freitas (2005), ressalta a importância do IAC, para fins de diagnósticos e prognósticos. Estas informações são de grande relevância, pois são capazes de caracterizar a região de estudo e prevenir ao máximo os danos negativos, oriundos de fenômenos climáticos intensos e anômalos. Com isso, pode-se dizer que o IAC é uma ferramenta eficiente para a

caracterização climática de uma região, um método viável de alerta e prevenção de consequências negativas intensas relacionadas a eventos de desastres ambientais.

Nesse sentido, o objetivo do estudo foi analisar o comportamento do regime pluviométrico na região da Floresta Nacional de Caxiuãna, na Amazonia, aplicando o Índice de Anomalia de Chuva (IAC) a série de dados de precipitação do período de 1981 a 2023, analisando os resultados em anos de eventos extremos (ENOS e ODP).

2. METODOLOGIA

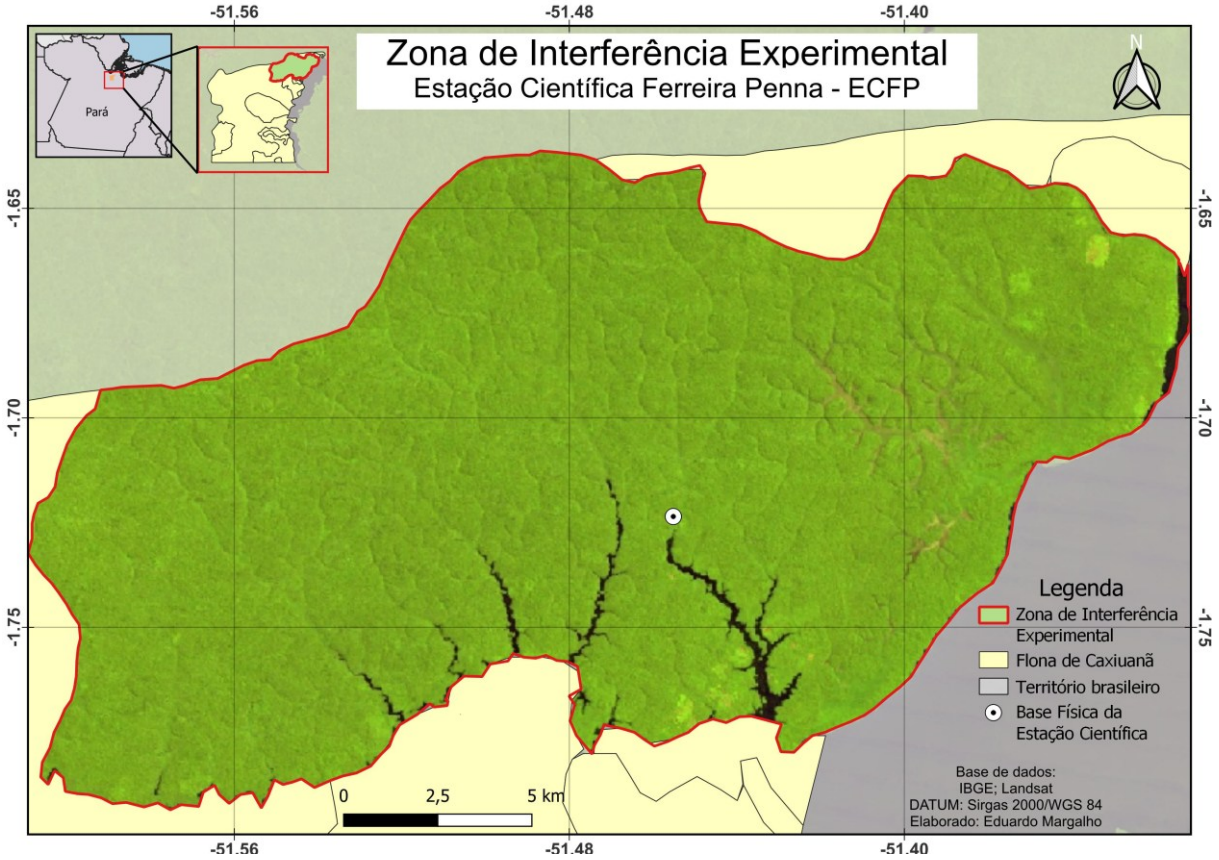
2.1. Local de Estudo

A Floresta Nacional de Caxiuanã, localizada no Estado do Pará, ocupa uma área de 324.060 ha, próxima da baía de Caxiuanã, entre os rios Xingu e Amazonas e compreende aproximadamente 70% do município de Portel e 30% do município de Melgaço (Lisboa, 2009). A Estação Científica Ferreira Penna (ECFPn), 01° 42’ 30’’S; 51° 31’ 45’’W; 60 metros de altitude, ocupa uma área de 10% dentro dos 324.060 ha da Floresta Nacional de Caxiuanã e tem como objetivo servir de suporte para desenvolvimento de pesquisas de curto, médio e longo prazo, além de manter parcerias com instituições de pesquisais, tanto nacionais como internacionais e é administrada pelo Museu Paraense Emilio Goeldi, MPEG (Lisboa, 1997).

O clima da região é caracterizado como tropical úmido, do tipo Ami, segundo a classificação de Köppen e o brilho de luz solar alcançam 2.100 horas ano-1.

A Figura 1, indica a localização do local de estudo.

Figura 1 - Localização da área de estudo.



De acordo com os dados do projeto ESECAFLOR, a precipitação pluviométrica anual varia de 2000-2500 mm e cerca de 85% da precipitação ocorre no período chuvoso, de dezembro a maio. Esses meses, quando em condições normais, apresentam somas nos valores de precipitação mensal acima de 100 mm, mostrando a forte influência de ZCIT (Zona de Convergência Inter Tropical), na distribuição de precipitação para a região. Durante o período seco, que se estende de junho a novembro, os valores de precipitação mensal se encontram sempre abaixo de 100 mm, com os meses de abril e agosto apresentando os maiores e menores valores médios de precipitação; 341,2mm e 18,4mm, respectivamente.

Os dados do projeto ESECAFLOR também indicam que a temperatura do ar tem sua distribuição bem uniforme durante o ano, registrando os maiores valores no período seco, de junho a novembro, com o mês de novembro apresentando o maior valor médio anual de 26,6°C; e os menores valores no período chuvoso, de dezembro a maio, com o mês de fevereiro apresentando valor médio de 24,8°C. A variação média mensal da umidade relativa do ar oscila entre 95% e 88%, nos meses de fevereiro e outubro respectivamente, com média anual de 89%.

A radiação solar global sofre influência da nebulosidade durante o período chuvoso, e em comparação ao período seco, sofre uma redução de 22%. Os valores registrados nos períodos chuvoso e seco apresentaram médias diárias de 282,8 e 366,8 W.m-2, respectivamente (Costa et al., 2009).

2.2. Projeto ESECAFLOR

O Experimento "O Impacto da Seca Prolongada nos Fluxos de Água e Dióxido de Carbono em uma Floresta Tropical Amazônica – Projeto ESECAFLOR" com coordenação de Antônio Carlos Lôla da Costa e Patrick Meir, iniciou em 2000, e consiste na criação, provocada artificialmente, de um período de estiagem na floresta tropical úmida, objetivando avaliar os impactos da seca nos fluxos de água e dióxido de carbono, neste ecossistema; objetiva também analisar a influência desta exclusão de água no solo, sobre o ciclo da floresta e as alterações provocadas pelo evento de seca (Meir et al., 2003).

A estrutura física do ESECAFLOR se constitui de duas parcelas, controle e exclusão (Figuras 02, 03, 04 e 05) de 1 ha cada uma, localizadas a cerca de 1 Km de distância da base física da Estação Científica Ferreira Pena (ECFPn). A parcela controle foi usada como referência para os experimentos realizados na parcela exclusão, na qual se fez a eliminação de, aproximadamente, 50% da água da chuva.

Figura 2 – a) Parcela controle do projeto ESECAFLOR. b) Parcela controle. c) Parcela de exclusão. d) Área do interior da parcela de exclusão. Fonte: Acervo do projeto.



Essas áreas foram delimitadas por trincheiras de 0,5 m de largura, cavadas com profundidade variando de 0,5 a 1,5 m para facilitar a drenagem da água da chuva. A trincheira da parcela exclusão foi revestida com lona plástica preta, para minimizar a infiltração lateral e, na parcela controle, não foi instalado este revestimento. Para cobertura da parcela exclusão foram utilizados, aproximadamente, 6000 painéis, com estrutura de madeira e revestimento plástico transparente, instalados a uma altura variando de 1,5 a 4 m acima do solo. Os painéis têm largura em torno de 0,5 m, e comprimento aproximado de 3 m, oscilando de acordo com o local, permitindo também a passagem, entre eles, da vegetação de subdossel e piso.

Nesta parcela exclusão construíram-se 20 calhas de madeira, com 0,3 m x 0,3 m de largura e profundidade, sendo que cada calha tem 100 m de comprimento e foram dispostas paralelamente a uma distância média de 5 m, com altura em torno dos 4 m na parte central da parcela e 1,5 m nas laterais. Para evitar a infiltração da água interceptada pelos painéis, as calhas também foram revestidas com o mesmo material plástico dos painéis, o que facilitou o escorrimento da água para as trincheiras laterais, que direcionam esses fluxos

para pontos de descarga distantes da parcela. A cobertura da parcela de exclusão é mantida sempre limpa, com substituição dos painéis com a estrutura ou o plástico danificado pela queda de galhos, frutos e, eventualmente, árvores. Utilizou-se, em cada uma das parcelas, uma torre de ferro galvanizado com dimensões de 1,2 x 1,8 x 30m de largura, comprimento e altura, respectivamente, sustentada por cabos-de-aço estendidos de diferentes alturas até o solo; referidas torres possuíam plataformas e escadas que permitiam fácil acesso às árvores (Costa et.al., 2007).

2.3. Dados

Os dados pluviométricos utilizados neste estudo foram disponibilizados pelo Projeto ESECAFLOR, oriundos de estações automáticas e convencionais situada na área do experimento, referente ao período de 2000 a 2023. Antes disso, de 1981 a 1999, o Programa de Grande Escala Biosfera-Atmosfera na Amazônia (LBA) disponibilizou os dados.

2.3.1 Índice de anomalia de chuva (IAC)

A análise do comportamento das precipitações feita através do indicie de anomalia de chuva que foi desenvolvido por Van Rooy (1965), incorpora um procedimento de classificação para ordenar magnitudes de anomalias de precipitações positivas (1) e negativas (2). Esse índice é considerado muito simples, dada a sua facilidade de procedimento computacional, que consiste na determinação de anomalias extremas. Rooy (1965) descreve que o índice visa tornar o desvio da precipitação em relação à condição normal de diversas regiões passíveis de comparação. O cálculo do IAC é feito através das seguintes expressões:

(1) $$\mathbf{IAC} = 3\left[\frac{(\mathbf{p} - \bar{\mathbf{p}})}{\bar{\mathbf{m}} - \bar{\mathbf{p}}}\right]$$

(2) $$\mathbf{IAC} = -3\left[\frac{(\mathbf{p} - \bar{\mathbf{p}})}{\bar{\mathbf{x}} - \bar{\mathbf{p}}}\right]$$

Sendo que:

p = precipitação observada (mm);

$\bar{p}$ = precipitação climatológica média (mm);

$\bar{m}$ = representa a média histórica dos dez valores mais altos (mm);

$\bar{x}$ = representa a média histórica dos dez valores mais baixos (mm).

Os valores do índice de anomalia de chuva são classificados em nove categorias que variam de extremamente úmido a extremamente seco (Tabela 1), de acordo com Rooy (1965). Considera-se que um valor acima ou abaixo de zero indica que o resultado foi comparado com a média histórica, e o período será classificado como chuvoso ou não chuvoso, ou seja, quanto mais o valor do índice se afastar de zero, maiores ou menores serão os volumes chuva.

Tabela 1 - Classificação das intensidades das anomalias negativas e positivas de precipitação de acordo com o IAC.

Intensidade do IAC	Classificação
≥ 4,00	Extremamente úmido
3,00 a 3,99	Umidade alta
2,00 a 2,99	Umidade moderada
0,50 a 1,99	Umidade baixa
´=-0,49 a 0,49	Normal
1,99 a 0,50	Seca fraca
2,00 a 2,99	Seca moderada
3,00 a 3,99	Seca forte
≥4,00	Seca severa

Fonte: Van Rooy, 1965.

2.3.2 ENOS

Os fenômenos de La Niña e El Niño foram classificados de acordo com os dados disponibilizados pelo INPE-CPTEC. Para o cálculo dos anos de ocorrência dos fenômenos foi considerado o período entre agosto de um ano até julho do ano seguinte. As intensidades dos fenômenos foram classificadas em 3 categorias (Tabela 2) considerando as anomalias de temperatura da superfície do mar (TSM) nos meses pertencentes a série.

Tabela 2 - Classificação das intensidades das anomalias negativas e positivas de TSM (°C).

Intensidade	La Nina	El nino
Forte	< - 1,5°	> 1,5°
Moderada	-1,5° a -1,0°	1,5° a 1,0°
Fraca	-1,0° a -0,5°	1,0° a 0,5°

Fonte: CPTEC, 2024.

No período de dados estudados, ocorreram 9 eventos do fenômeno La Niña (1989, 1999, 2000, 2007, 2008, 2010, 2011, 2017 e 2018), classificados como moderados e 9 eventos de El Niño (1983, 1987, 1988, 1991, 1992, 1997, 1998, 2015 e 2016) classificados como fortes.

Além disso, foram analisados dados de Oscilação Decadal do Pacífico (ODP) para analisar as fases positivas e negativas com relação ao IAC calculados nos anos correspondentes. A ODP é frequentemente descrita como um padrão de longa duração de variabilidade climática do Pacífico, com extremos marcados por variações de temperatura na Bacia do Pacífico e no clima da América do Norte. Paralelamente ao fenômeno ENOS, as fases extremas da ODP foram classificadas como quentes (negativas) ou frias (positivas), conforme definido por anomalias de temperatura oceânica no Nordeste e no Oceano Pacífico tropical. Quando as temperaturas são anormalmente frias no interior do Pacífico Norte e quentes ao longo da América do Norte, e quando as pressões do nível do mar estão abaixo da média sobre o Pacífico Norte, a ODP tem um valor positivo. Quando os padrões são invertidos, com anomalias de temperatura quentes no interior e anomalias de temperaturas frias ao longo da costa, ou pressões acima da média do nível do mar sobre o Pacífico Norte, a ODP tem um valor negativo (NOAA, 2024).

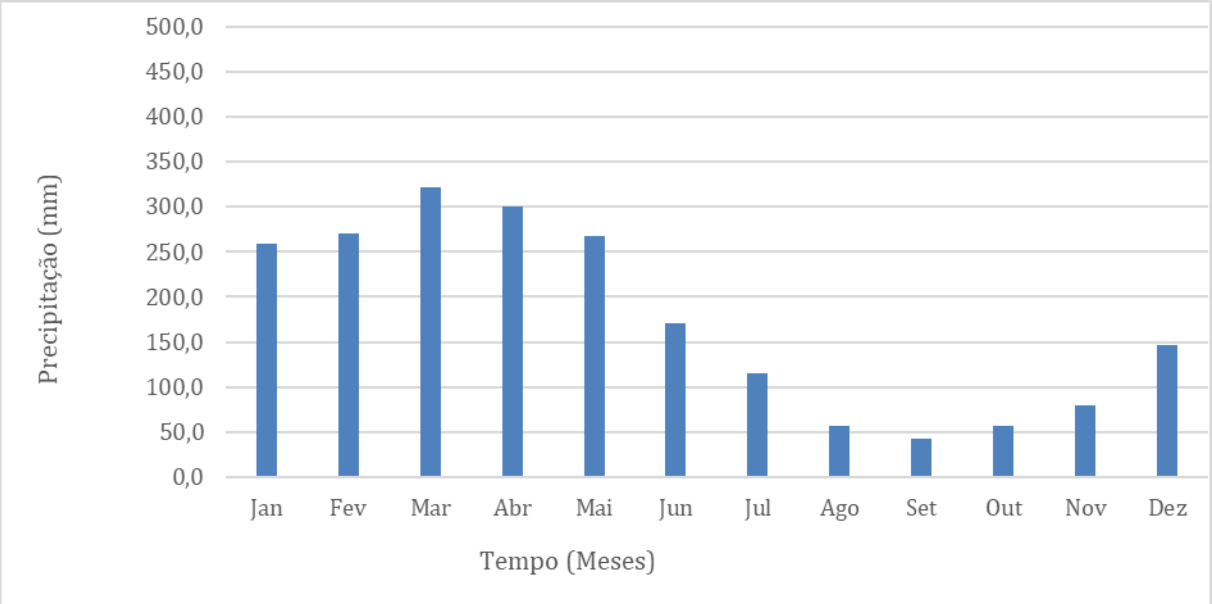
3. DESENVOLVIMENTO

A climatologia da precipitação em Caxiuanã nos últimos 42 anos.

Com a média do período de 1981 a 2023 obteve-se a climatologia da região e assim a evolução da precipitação pluviométrica, em mm, considerando as médias mensais para a região de Caxiuanã (Figura 3). Analisando o comportamento da precipitação verifica-se uma sazonalidade bem definida, com o período chuvoso concentrado entre os meses de dezembro e maio, enquanto o período seco está compreendido entre junho e novembro. A

precipitação sobe de 146,4 mm em dezembro para 322,2 mm em março e a partir disso passa a diminuir seus volumes em abril (299.8 mm) até atingir o valor mínimo anual em setembro, com 43,2 mm.

Figura 3 - Climatologia (média mensal 1981-2023) da precipitação (mm) em Caxiuanã.



Considerando os 42 anos investigados, 10 totais anuais se destacaram em volumes positivos de precipitação (2016, 2021, 2022, 1994, 1989, 1988, 2005, 2017, 2013 e 2019). Analisando o comportamento de precipitação pela média mensal desses anos (Figura 4) nota-se que a sazonalidade definida em período chuvoso e seco se manteve, com março sendo o mês com mais precipitação (459,6 mm) e setembro com menos (84 mm).

As médias mensais dos 10 anos com volumes de precipitação abaixo da média (1993, 1987, 2001, 2006, 1992, 2010, 1983, 2015, 2000 e 1999) mantiveram a sazonalidade ainda perceptível (Figura 5), mas com volumes aproximadamente 75% menores que os observados nos anos mais chuvosos. O mês de março ainda com maior volume de precipitação (202 mm) e o mês de outubro com o menor volume (13 mm).

Figura 4 – Média mensal da precipitação (mm) dos anos mais chuvosos em Caxiuanã.

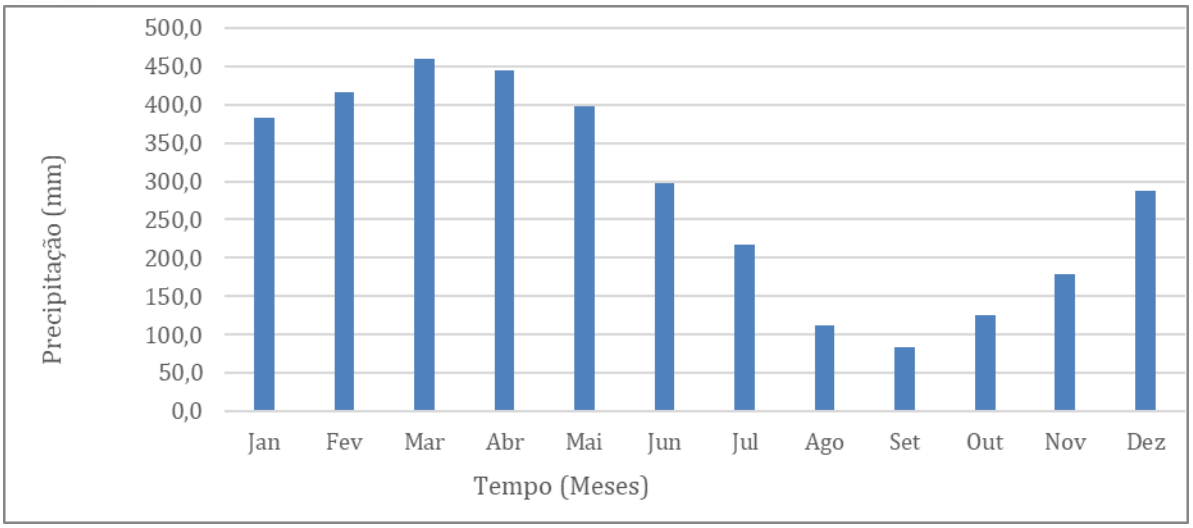
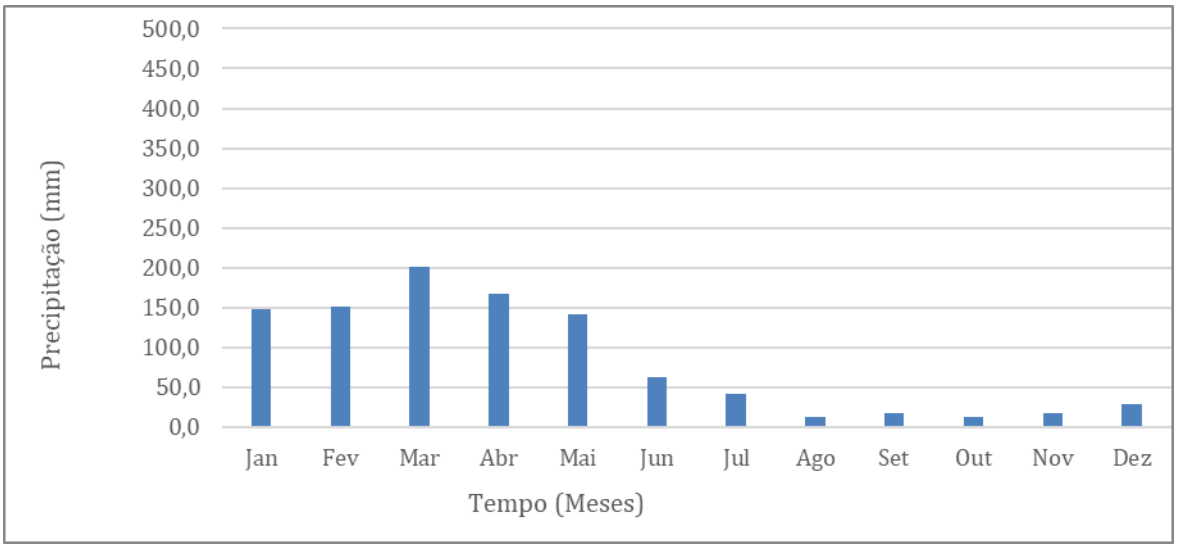


Figura 5 – Média mensal da precipitação (mm) dos anos menos chuvosos em Caxiuanã.



Índice de anomalia de chuva (IAC) em Caxiuanã

A aplicação da metodologia do IAC nos dados mensais de precipitação da área estudada, resultou na série temporal de 1981 a 2023, mostrada nas figuras 6 e 7, anomalias negativas e positivas respectivamente.

Na figura 6, nota-se grande variabilidade temporal de IAC no período estudado, com valores oscilando entre índices positivos e negativos, independente do período do ano. Em particular, os índices negativos, que indicam a ocorrência de precipitação abaixo do normal, concentram-se em sua grande maioria nas categorias de SF (seca fraca) e SM (seca

moderada. Eventos de baixas precipitações, ditas como SS (seca severa) são bem esporádicas.

Figura 6 – Anomalias negativas para a região de Caxiuanã durante os meses de janeiro a dezembro de 1981 a 2023.

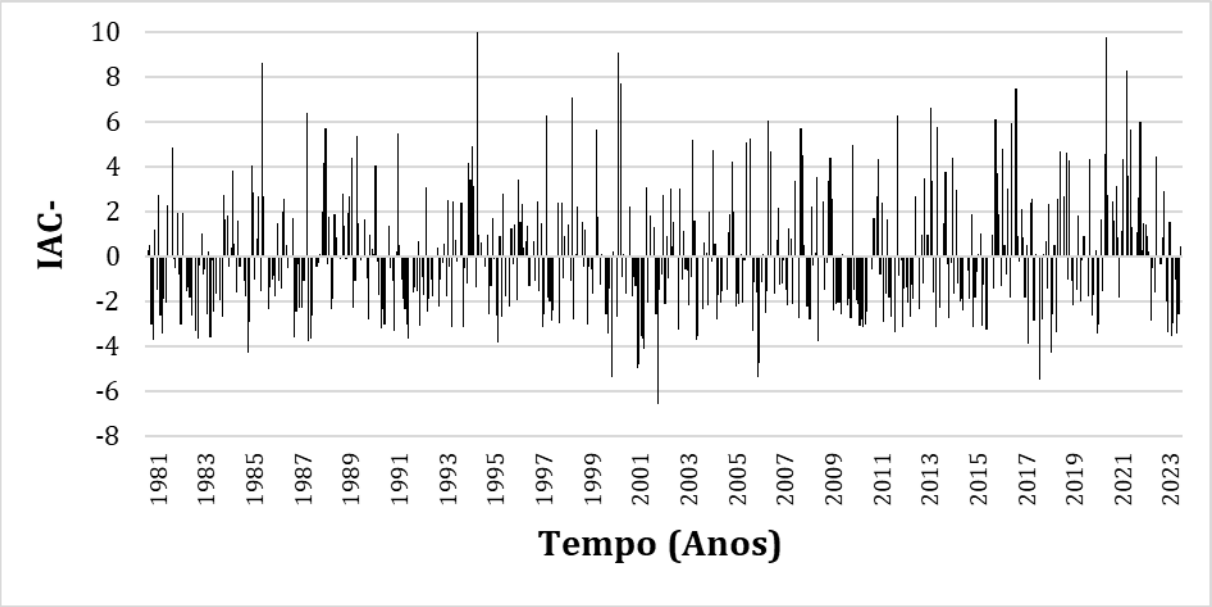
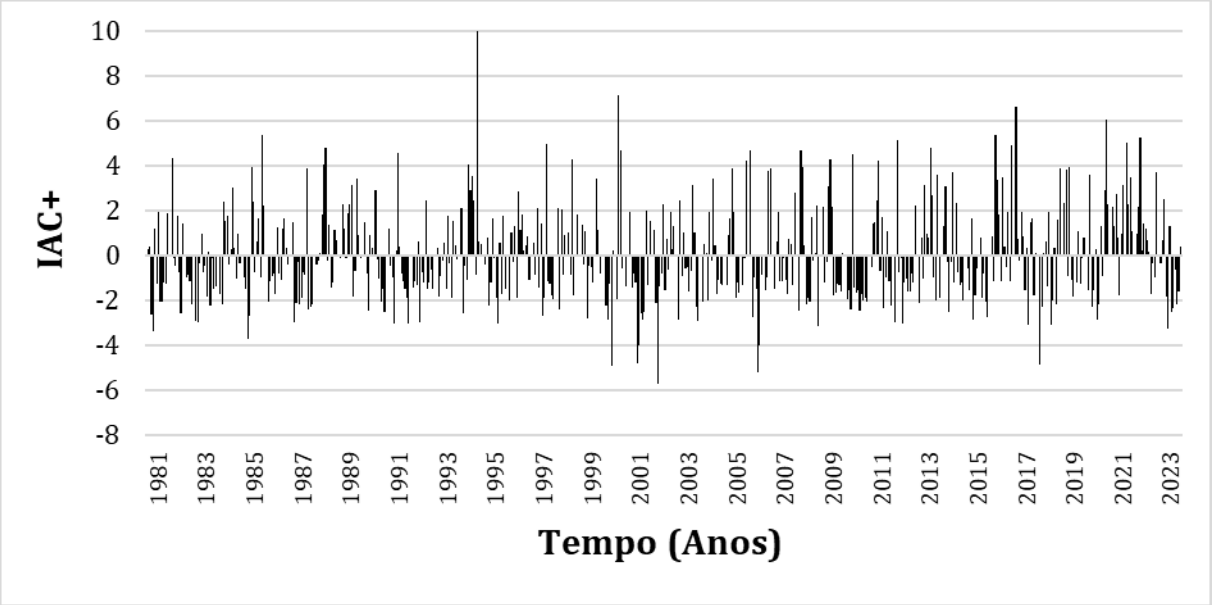


Figura 7 – Anomalias positivas para a região de Caxiuanã durante os meses de janeiro a dezembro de 1981 a 2023.



Na figura 7, além da grande variabilidade temporal de IAC, os índices positivos, que indicam a ocorrência de precipitação acima do normal, concentram-se em sua grande

maioria nas categorias de N (normal), UB (umidade baixa) e UM (umidade moderada). Eventos de altas precipitações, ditas como EU (extremamente úmidos) são atribuídos em sua maioria a eventos como La Niña (2000).

É importante ressaltar que na Amazônia os extremos de precipitação não acontecem no mesmo espaço, no mesmo período e nem na mesma intensidade (Marengo et al., 2008). As secas na região são impactadas por fenômenos meteorológicos e quando associadas ao ENOS, por exemplo, geram anomalias pluviométricas afetando, principalmente, o Norte, Centro e Leste da Amazônia; já quando as secas estão associadas a outras anomalias, geralmente é o oeste da Amazônia que é afetado (Aragão et al., 2007).

Enos

Com relação aos eventos interanuais El Niño e La Niña, foram relacionados os IAC´s nos períodos dos eventos considerados de acordo com o CPTEC/INPE (2024), demonstraram respostas variáveis. Marengo (2005) e Wang et al. (2011) destacaram a forte relação entre os eventos La Niña e El Niño e os cenários de alta e seca pluviométrica na região amazônica.

Na figura 8 e 9, temos o índice de anomalia negativos e o de anomalias positivos, respectivamente, nos anos que tiveram a ocorrência do fenômeno El Niño (classificados como fortes). Os IAC´s em sua maioria demonstraram a seca esperada para esse fenômeno, com o período mais seco na região (setembro a novembro) apresentando valores variando de seca moderada a severa em todas as ocorrências. Destaca-se o El Niño do ano 2015, que foi considerado um El Niño extremo, onde os valores variaram de seca fraca a forte durante todo o ano, até mesmo no período mais chuvoso, com a única exceção sendo o mês de março que ficou classificado como moderadamente úmido.

No ano de 1998 e 2016, considerados períodos de transição (NOAA,2024), vemos valores de IAC representando umidade moderado e extremamente úmido no mês de março (período mais chuvoso), e valores de umidade alta a extremamente alta nos meses de setembro e outubro (período mais seco).

Figura 8 – Anomalias negativas para Caxiuanã durante os eventos de El Niño. Fonte: CPTEC, 2024.

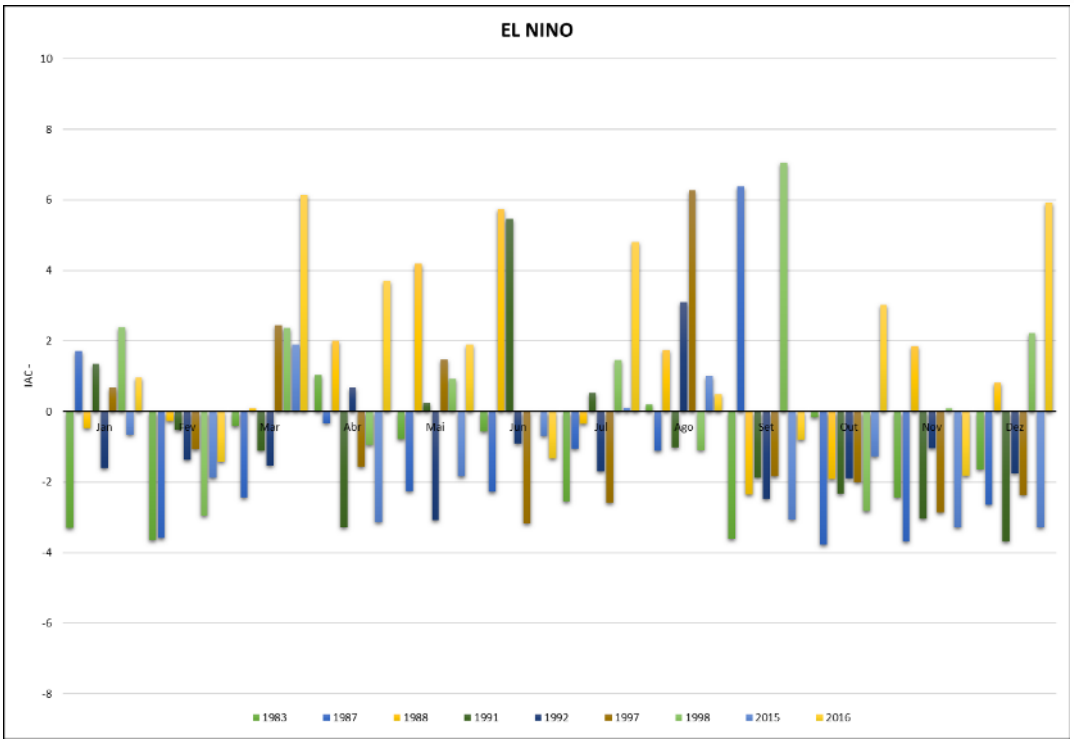
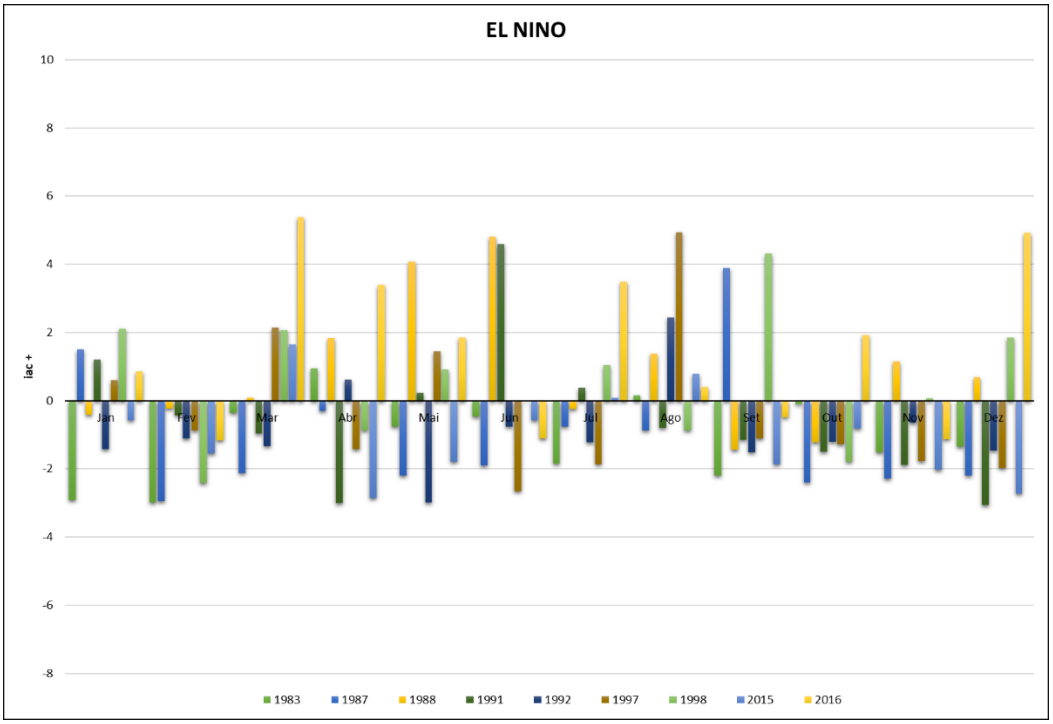


Figura 9 – Anomalias positivas para Caxiuanã durante os eventos de El Niño. Fonte: CPTEC, 2024.



Os demais valores variaram entre umidade moderada e fortes secas, porém o que chama atenção é que no período chuvoso na região, em todos os eventos, houve períodos

de seca significativos indicando os efeitos negativos que este evento tem sobre a precipitação na região.

Nos anos configurados como período de La Niña moderada (figuras 10 e 11) os IAC´s seguiram o esperado com mais períodos classificados como normais e úmidos, com os anos de 1989 e 2017 se apresentando úmidos na classificação por apresentar somente 2 meses com resultados indicando seca fraca.

No evento do ano de 2000, temos a ocorrência de IAC´s classificados como seca fraca a seca severa durante boa parte do ano, com exceção de IAC´s extremamente úmidos nos meses de agosto e setembro, que são comumente considerados período seco na região. Nisso podemos considerar o fato de que os fenômenos tendem a impactar na região a partir do segundo semestre do ano, justificando resultados como este.

Já nos eventos dos anos 2010 e 2018, os resultados foram de secas durante os meses, porém eles são classificados como anos de transição (NOAA, 2024), assim sofrendo interferência das duas fases de ENOS.

Nery e Siqueiras (2020) obtiveram observações semelhantes aos resultados deste trabalho, os dois autores notaram que o índice IAC mostrou-se ser uma ferramenta útil para análise de períodos secos e chuvosos, apresentando variabilidade de ano para ano e de evento para evento. E os anos de ocorrência de El Niño também apresentaram, anomalias positivas, assim como os anos de ocorrência de La Niña também apresentaram anos negativos.

Para Chechi e Sanches (2013) a técnica de IAC apresenta maior correspondência nos eventos de El Niño do que nos anos de La Niña.

Figura 10 – Anomalias negativas para Caxiuanã durante os eventos de La Niña. Fonte: CPTEC, 2024.

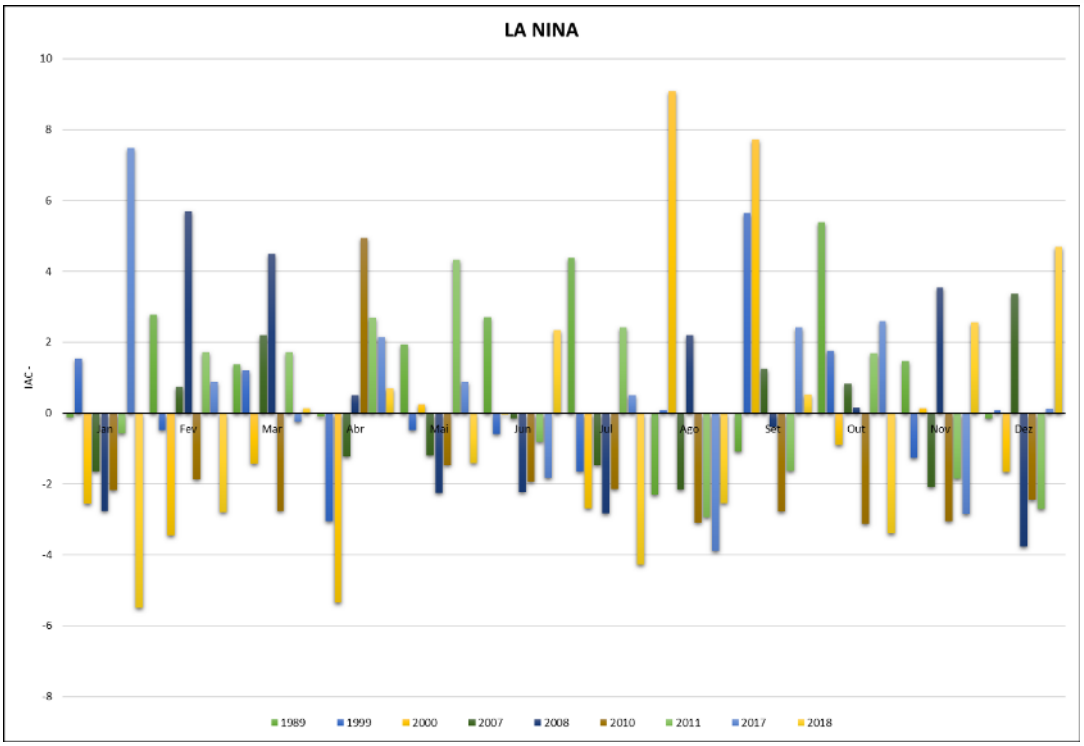
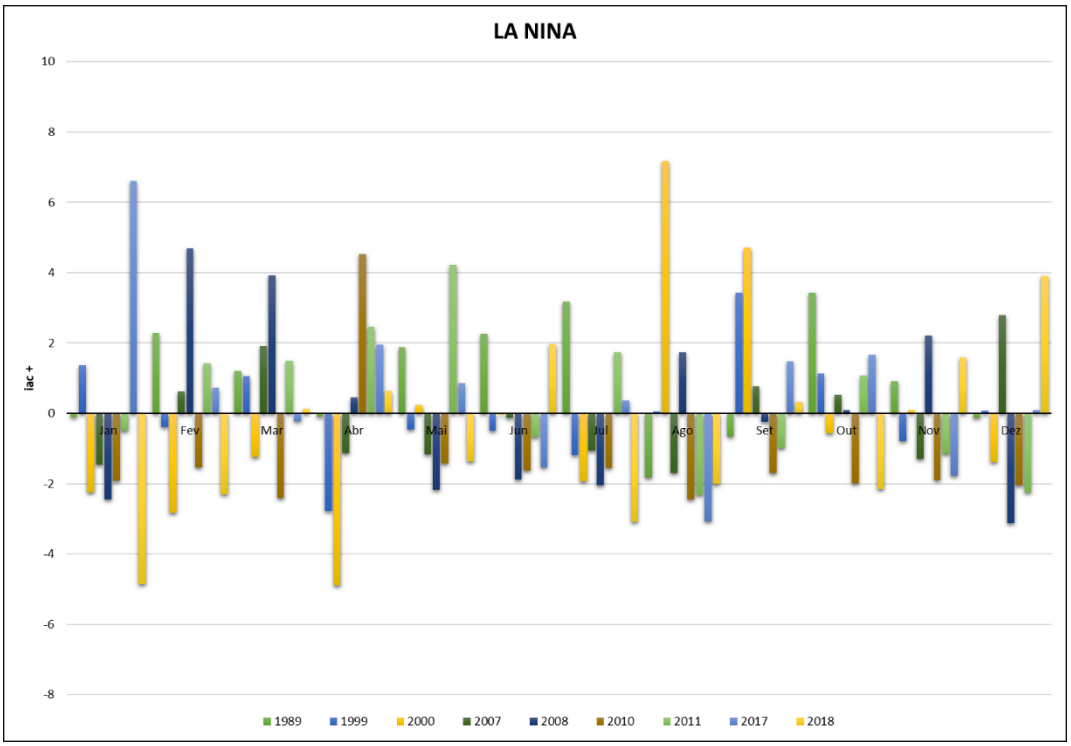


Figura 11 – Anomalias positivas para Caxiuanã durante os eventos de La Niña. Fonte: CPTEC, 2024.



Com relação a Oscilação Decadal do Pacífico (ODP) (NOAA, 2024), as fases positivas durante o período deste estudo foram os anos 1984, 1985, 1988, 1989, 1995, 1999, 2000,

2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2020, 2021 e 2022; já as fases negativas foram os anos 1983, 1987, 1991, 1992, 1994, 1997, 2002, 2003, 2004, 2009, 2015, 2016, 2018, 2019 e 2023.

Durante a fase positiva de ODP (figura 12) os valores de IAC´s apresentaram valores positivos de chuva entre normal e extremamente úmido, com exceção dos anos de 2000 e 2010 que apresentaram valores de seca não esperados para o período. No ano 2000 houve a mudança de fase da ODP nos anos seguintes, mas em 2010 a fase positiva se estabeleceu após o mês de maio vindo de um período negativo do ano 2009 (ano em que fases negativas e positivas foram registradas, que consideraremos como anos de transição).

Figura 12 – Anomalias positivas e negativas para Caxiuanã nos anos de fase positiva da ODP. Fonte: NOAA,2024.

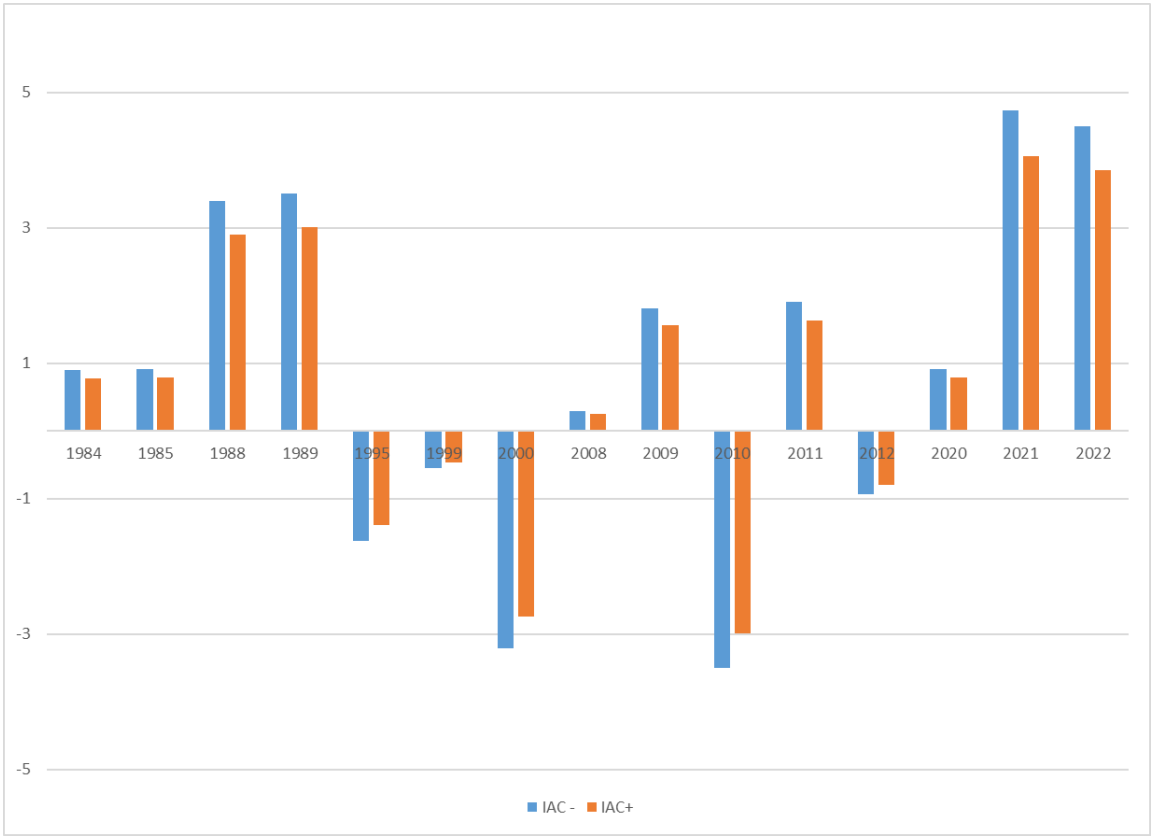
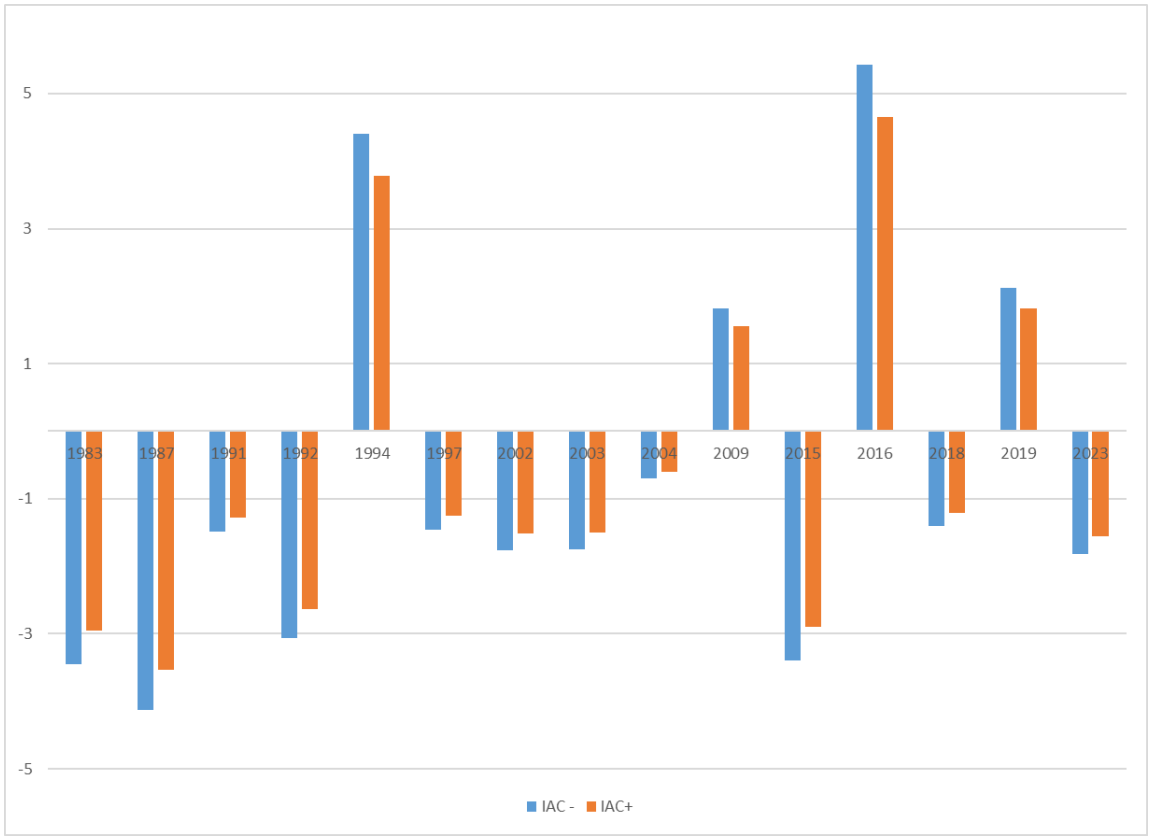


Figura 13 – Anomalias positivas e negativas para Caxiuanã nos anos de fase negativa da ODP. Fonte: NOAA,2024.



Durante a fase negativa de ODP (figura 13) os valores de IAC´s mostraram períodos variando de seca fraca a seca severa, com exceção de 1994 e 2016 (classificados como extremamente úmido), 2009 (Umidade baixa) e 2019 (Umidade moderada). Esses anos tiveram sua ODP variando durante o ano, logo todos considerados períodos de transição.

Observamos assim, que a relação de ODP com as intensidades calculadas do IAC para o período, coincidem; onde as fases positivas agravam o volume de precipitação e nas fases negativas diminuem este volume.

Andreolli (2005) analisou a circulação atmosférica relacionadas ao ENOS, nos meses de novembro a fevereiro, e encontrou diferenças com ambas as fases de ODP na região Amazônica. As anomalias de precipitação de maior magnitude para ODP positiva nesta região foram consistentes com o movimento descendente e circulação ciclônica sobre a região, enquanto em ODP negativa os padrões de circulação foram mais fracos, resultando em fracas anomalias de precipitação.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A aplicação do IAC nas simulações mensais de precipitação, permitiu observar o cenário da climatologia da floresta Nacional de Caxiuanã, na Amazônia, mostrando as variações que ocorrem nos períodos considerados chuvosos (dezembro a maio) e secos (junho a novembro). Este estudo reafirma a importância de se manter um banco de dados atualizados com análises constantes para quantificar se os eventos extremos têm caminhado para um cenário de mudança da climatologia local.

É importante observar a relação dos IACs aplicados nos anos de ocorrência de ENOS; onde percebe-se que nos anos de El Niño, tais como os de 2015 e 1997, apresentam redução na precipitação em todos os meses, enquanto o La Niña de 2017 foi o único que apresentou aumentos relevantes em precipitação. Nos anos de La Niña, classificados como moderados que ocorreram no período, os meses com seca variaram de uma forma inesperada para o estudo, diferente dos anos de El Niño, considerados fortes, que apresentou a seca esperada. Com isso, pode-se dizer que o índice foi mais satisfatório nas análises dos anos que tiveram ocorrência de El Niño, do que nos anos de La Niña. Já nas análises de ODPs, vemos muito mais coerência nos resultados relacionados ao IAC, positivos com períodos úmidos e negativos com períodos secos.

Tais análises sugerem um comportamento de precipitação variável para a região, sendo influenciado por eventos interanuais, onde ocorrências de El Niño severos tem tido maiores impactos. No período do estudo, não houve nenhuma ocorrência de La Ninã caracterizada como severa, somente moderada interferindo na região de maneira menos intensa quando comparada com os impactos que eventos de El Niño acarretaram no mesmo período. Isto sugere uma tendência climatológica voltada para períodos mais prolongados de seca, com menos ocorrência de fenômenos que influenciem positivamente na precipitação da região. Com isso, se faz necessário o acompanhamento desta tendencia para confirmar ou descartar tais hipóteses e o uso de IAC pode auxiliar nas análises.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Museu Paraense Emílio Goeldi (MPEG) e ao conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela oportunidade de realizar

este estudo através do Programa de Capacitação Institucional do Museu Paraense Emílio Goeldi.

Agradecemos também os projetos ESECAFLOR e LBA pelo uso e disponibilidade de dados, infraestrutura e suporte logístico durante as atividades de campo.

REFERÊNCIAS

ANDREOLI, R. V.; KAYANO, M. T. **ENSO-related Rainfall Anomalies in South America and Associated Circulation Features During Warm and Cold Pacific Decadal Oscillation Regimes.** International Journal of Climatology, v. 25, p. 2.017-30, 2005.

ARAGÃO, L.E.O.C.; MALHI, Y.; ROMAN-CUESTA, R.M.; SAATCHI, S.; ANDERSON, L.O.; SHIMABUKURO, Y.E. **Spatial patterns and fire response of recent Amazonian droughts**. Geophysical Research Letters, v. 34, n. 1, p. 1- 5, 2007.

ARAGÃO, L.E.O.C.; ANDERSON, L.O.; FONSECA, M.G.; ROSAN, T.M.; VEDOVATO, L.B.; *et al.* **21st Century drought-related fires counteract the decline of Amazon deforestation carbon emissions**. Nature Communications, v. 9, p. 536, 2018.

CLARKE, ROGER G.; DE SILVA, HARINDRA; SAPRA, STEVEN. **Toward more information-efficient portfolios**. Journal of Portfolio Management, v. 31, n. 1, p. 54, 2004.

COSTA, R. F. DA; SILVA V. P. R. DA; RUIVO M. L. P.; MEIR P.; COSTA, A. C. L. DA, MALHI Y. S.; BRAGA A. P.; GONÇALVES P. H. L.; SILVA JUNIOR, J. A& GRACE J. **Transpiração em espécie de grande porte na Floresta Nacional de Caxiuanã, Pará**. Revista Brasileira de Eng. Agricola e Ambiental. v.11, n.2, p.180-189, 2007.

DA COSTA, Antonio Carlos Lôla et al. Variabilidade mensal e horária de elementos meteorológicos na área experimental do Projeto ESECAFLOR na Floresta Nacional de Caxiuanã, Pará, Brasil. Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi-Ciências Naturais, v. 11, n. 3, p. 365-375, 2016.

CHECHI, Leonardo; SANCHES, Fábio de Oliveira. **O uso do Índice de Anomalia de Chuva (IAC) na avaliação do fenômeno do El Niño Oscilação Sul (ENOS) no Alto Uruguai Gaúcho entre 1957-2012.** Revista Brasileira de Geografia Física, v. 6, n. 6, p. 1586-1597, 2013.

FREITAS, M.A.S. **Um sistema de suporte à decisão para o monitoramento de secas meteorológicas em regiões semiáridas**. Revista Tecnologia, v. 19 (suppl)., n. 1, p. 84-95, 2005.

GLOOR, M.; BARICHIVICH, J.; ZIV, G. **Recent Amazon climate as background for possible ongoing and future changes of Amazon humid forests.** Global Biogeochemical Cycles, v. 29, p. 1384-1399, 2015.

HALPERT, Michael S.; ROPELEWSKI, Chester F. **Surface temperature patterns associated with the Southern Oscillation.** Journal of Climate, p. 577-593, 1992.

INPE - CPTEC. Disponivel em: http://enos.cptec.inpe.br/. Acesso em 22 de novembro de 2024.

LISBOA, Pedro LB. **Florística e estrutura dos ambientes**. Caxiuanã, p. 163-193, 1997.

MADDEN, Roland A.; JULIAN, Paul R. **Observations of the 40–50-day tropical oscillation—A review.** Monthly weather review, v. 122, n. 5, p. 814-837, 1994.

MARENGO, Jose A. **Characteristics and spatio-temporal variability of the Amazon River Basin Water Budget.** Climate Dynamics, v. 24, n. 1, p. 11-22, 2005.

MARENGO, Jose A.; VALVERDE, Maria C. **Caracterização do clima no Século XX e Cenário de Mudanças de clima para o Brasil no Século XXI usando os modelos do IPCC-AR4.** Revista Multiciência, v. 8, n. 1, p. 5-28, 2007.

MARENGO, J.A; NOBRE, C.A.; TOMASELLA, J.; OYAMA, M.D.; OLIVEIRA, G.V.S.; OLIVEIRA, R.; CAMARGO, H.; ALVES, L.M.; BROWN, F. **The drought of Amazonia in 2005**. Journal of Climate, v. 21, n. 3, p. 495-516, 2008.

MARENGO, Jose A. et al. **The drought of 2010 in the context of historical droughts in the Amazon region.** Geophysical research letters, v. 38, n. 12, 2011a.

MARENGO, J. A. et al. **Climate change in the Amazon Basin: Tipping points, changes in extremes, and impacts on natural and human systems. In: Tropical rainforest responses to climatic change**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011b. p. 259-283.

MARENGO, J.A.; Espinoza, J.C. **Extreme seasonal droughts and floods in Amazonia: Causes, trends and impacts.** International Journal of Climatology, v. 36, n. 3, p. 1033-1050, 2016.

MEIR, P.; COSTA, A.C.L.; COSTA, R. F. DA.; FISHER, R. A.; SOTTA, E. D.; VALE, R. L.; SILVA JUNIOR, J. A.; ALMEIDA, S.S.; RUIVO, M.L.P.; COSTA, J. M. N.; CARVALHO, C.; MAROCO, J.; CHAVES, M.; WILLIAMS, M.; MALHI, Y.; GRACE, J. **Effects of experimental drought on carbon cycling in an Eastern Amazon rain forest.** In: Science Team Business Meeting. 7, 2003, Fortaleza. Proceedings...Results of Ecological Studies of LBA. Fortaleza: LBA/ECO, 2003, CD-Rom.

NERY, J. T.; SIQUEIRAS, B. 2020. **Índice de anomalia de chuva aplicado ao estudo das precipitações no estado do Paraná.** Revista Brasileira de Climatologia, 27, 772-788,

NOAA. Disponivel em: https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php Acesso em 21 de novembro das 2024.

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

RAVELO, A. C.; FAIRBANKS, R. G.; PHILANDER, S. G. H. **Reconstructing tropical Atlantic hydrography using planktontic foraminifera and an ocean model**. Paleoceanography, v. 5, n. 3, p. 409-431, 1990.

ROCHA, Thaís Braga Carneiro et al. **Indicadores de Veranicos e de Distribuição de Chuva no Ceará e os Impactos na Agricultura de Sequeiro**. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 36, p. 579-589, 2021.

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

SENEVIRATNE S.I.; NICHOLLS, N.; EASTERLING, D. **Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment.** Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. Cambridge: Cambridge University Press, pp. 109-230, 2012.

SOARES, A. C. L.; LISBOA, P. L. B. **A Estação Científica Ferreira Penna/ECFPn (2002-2008). Caxiuanã: desafios para a conservação de uma Floresta Nacional na Amazônia.** Museu Paraense Emílio Goeldi, Belém, p. 23-42, 2009.

SOUZA, E.B.; AMBRIZZI, T. **Pentad precipitation climatology over Brazil and the associated atmospheric mechanisms.** Climanálise, v. 1, p. 1-20, 2003.

WANG, Jingqian et al. **El Niño–Southern Oscillation in tropical and midlatitude column ozone.** Journal of the atmospheric sciences, v. 68, n. 9, p. 1911-1921, 2011.