Revista Brasileira de Climatologia
ISSN: 2237-8642 (Eletrônica)

IDENTIFICAÇÃO DE EXTREMOS DE PRECIPITAÇÃO EM MUNICÍPIOS DO ESTADO DO PARÁ E SUA RELAÇÃO COM OS MODOS CLIMÁTICOS ATUANTES NOS OCEANOS PACÍFICO E ATLÂNTICO

FERREIRA, Douglas Batista da Silva – douglas.silva.ferreira@itv.org
Instituto Tecnológico Vale / ITV

SOUZA, Everaldo Barreiros – everaldo@ufpa.br
Universidade Federal do Pará / UFPA

OLIVEIRA, Juarez Ventura de – juarez.oliveira@pq.itv.org
Bolsista de Pós-Doutorado CAPES - Instituto Tecnológico Vale / ITV

Submetido em: 01/02/2019
Aceito para publicação em: 27/07/2020
Publicado em: 30/07/2020
DOI: http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v27i0.64630

RESUMO: Durante as últimas duas décadas, os extremos climáticos têm sido recorrentes na Amazônia, como secas intensas e períodos chuvosos mais prolongados que o normal, os quais invariavelmente exercem impactos na população e em diversos setores da economia. Por esse motivo, o presente estudo tem como objetivo investigar quantitativamente a frequência dos extremos climáticos secos (ExtSEC) e chuvosos (ExtCHU) através do cálculo do Standard Precipitation Index (SPI) nos dados de precipitação do satélite TRMM para os 143 municípios do estado do Pará no período de 1998 a 2015. Adicionalmente, analisam-se os modos climáticos tropicais dos Oceanos Pacífico e Atlântico associados à ocorrência dos distintos eventos extremos de precipitação. Os resultados indicaram que, em termos anuais, a ocorrência dos ExtCHU é relativamente maior (8 a 12%) do que os ExtSEC (2 a 8%). Em termos sazonais, os ExtCHU se distribuem regularmente ao longo dos quatro trimestres do ano, enquanto os ExtSEC ocorrem preferencialmente nos trimestres de DJF e MAM, sendo que em JJA se restringem ao setor nordeste e em SON predominam nos municípios situados no oeste/sul/sudeste do estado. As análises de composições revelaram que o modo climático El Niño no Oceano Pacífico e o modo gradiente do Atlântico com anomalias de TSM positivas na bacia norte e negativas na bacia sul provocam a inibição da atividade convectiva da ZCIT e explicam a ocorrência dos eventos de extremos secos em grande parte do estado. Inversamente, a presença concomitante da La Niña no Pacífico e do modo gradiente do Atlântico com TSM anomalamente negativa ao norte e positiva ao sul, intensificam os eventos da ZCIT na região e originam os extremos chuvosos na maior parte dos municípios do Pará.

PALAVRAS-CHAVE: Extremos climáticos, TRMM, Amazônia Oriental, Modos de Variabilidade.

IDENTIFICATION OF RAINFALL EXTREMES IN THE MUNICIPALITIES OF PARÁ STATE AND RELATIONSHIPS WITH THE PACIFIC AND ATLANTIC CLIMATE MODES

ABSTRACT: Over the past two decades, climatic extremes have been recurrent in the Amazon, with intense droughts and longer than normal rainy periods, which invariably impact the population and various sectors of the economy. For this reason, the present study aims to quantitatively investigate the frequency of dry (ExtSEC) and rainy (ExtCHU) climatic extremes by calculating the Standard Precipitation Index (SPI) in the TRMM satellite precipitation data for the 143 municipalities in the state of Pará in the period 1998 to 2015. Additionally, the tropical climate modes of the Pacific and Atlantic Oceans associated with the occurrence of different extreme precipitation events will be analyzed. The results indicated that, in annual terms, the occurrence of ExtCHU is relatively higher (8 to 12%) than ExtSEC (2 to 8%). In seasonal terms, ExtCHU are

regularly distributed throughout the four quarters of the year, while ExtSEC occur preferentially in the DJF and MAM quarters, with JJA being restricted to the northeast sector and SON predominating in the municipalities located in the west / south / southeast of the state. The analysis of compositions revealed that the El Niño climatic mode in the Pacific Ocean and the Atlantic gradient mode with positive TSM anomalies in the north basin and negative in the south basin cause the inhibition of the ZCIT convective activity and explain the occurrence of dry extremes events in much of the state. Conversely, the concomitant presence of La Niña in the Pacific and the gradient mode of the Atlantic with TSM anomalously negative in the north and positive in the south, intensify the ZCIT events in the region and originate the rainy extremes in most municipalities in Pará.

KEYWORDS: Climate extremes, TRMM, Eastern Amazon, Modes of Variability.

1. INTRODUÇÃO

Dentro da troposfera da Terra ocorrem os fenômenos meteorológicos e mecanismos climáticos que se relacionam a circulação geral, regional e local da atmosfera, os quais são responsáveis em grande parte pelas variações, oscilações ou variabilidade climática. Assim, o amplo espectro das variações ou variabilidades que ocorrem no espaço (escala local, regional, continental e global) e tempo (escala diária, semanal, mensal, anual, decadal e secular) são características intrínsecas e marcantes do clima. Segundo o Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), a variabilidade climática refere-se as variações no estado médio e outras estatísticas (como desvios-padrão, ocorrência de extremos, etc.) do clima em todas as escalas espaciais e temporais além da ocorrência de eventos extremos. A variabilidade pode ser devido à processos internos naturais dentro do sistema climático (variabilidade interna) ou às variações nas forçantes externas naturais ou antropogênicas (variabilidade externa). Quando tais flutuações se distanciam significativamente da média, tem-se a ocorrência de um extremo climático (MARENGO et al., 2009). Os eventos extremos, portanto, fazem parte da variabilidade natural do clima. Em regiões tropicais, a precipitação pluviométrica apresenta uma alta variabilidade espaço/temporal, sendo a variável que melhor caracteriza o clima regional e é comumente utilizada na avaliação dos extremos climáticos (LIEBMANN e MARENGO, 2001).

Em particular, a Amazônia vem experimentando a ocorrência e recorrência de episódios climáticos extremos, tanto de excesso, quanto de déficit pluviométrico, de modo que a população tem sofrido com as secas e estiagens intensas e duradouras ou períodos chuvosos fortes e prolongados associados as enchentes e inundações. Em ocasiões de períodos com pluviosidade escassa, os níveis fluviométricos baixam consideravelmente e prejudicam a produção de alimentos (agricultura e pesca). Sob outra perspectiva, em condições de pluviosidade excessiva, os municípios com área urbana maior e infraestrutura e serviços públicos inadequados são impactados nas dimensões sociais e econômicas, a exemplo do maior número de casos de doenças tropicais transmitidas por insetos vetores, prejuízos materiais devido o alagamento de vias e residências, quedas de árvores e potenciais perdas de vidas humanas.

Nas últimas décadas, uma série de extremos climáticos deflagraram impactos nas comunidades e ecossistemas da Amazônia. Por exemplo, as secas de 2005, 2010 e 2015 caracterizaram-se pela severidade e área de abrangência,

ISSN: 2237-8642 (Eletrônica)

impactando grande parte dos estados amazônicos, cujos registros de nível fluviométrico de alguns importantes rios atingiram marcas mínimas históricas (LEWIS et al., 2011; MARENGO et al., 2008; MARENGO et al., 2013; ZENG et al., 2008), além de um aumento de incêndios florestais (CARDOSO et al., 2003; BROWN et al., 2006). Analogamente, os períodos chuvosos extremos, como aqueles ocorridos em 2009 e 2012 causaram efeitos adversos em vários setores da economia (MARENGO et al., 2013). Essa proximidade de ocorrência de tais extremos climáticos está em conformidade com os prognósticos do relatório do IPCC, que indicam uma maior frequência de eventos anômalos em cenários de clima futuro (IPCC, 2013).

Uma ferramenta comumente utilizada para monitorar as condições de secas e chuvas intensas são os índices climáticos. Vários índices podem ser usados para diagnosticar e prognosticar a ocorrência de extremos, visando adotar medidas de mitigação e políticas apropriadas para a gestão dos recursos hídricos. Uma técnica que vem sendo amplamente usada para a determinação de extremos climáticos é o Standard Precipitation Index (SPI), cujo método foi aplicado em diversas partes do globo, incluindo o Brasil (BELAYNEH e ADAMOWSKI, 2012; MCKEE, DOESKEN e KLEIST, 1993; SANTOS et al., 2017). Neste trabalho, o SPI foi utilizado pela sua simplicidade e habilidade em representar a ocorrência de extremos em múltiplas escalas de tempo.

A variabilidade da precipitação sazonal da Amazônia, incluindo a ocorrência de extremos secos e chuvosos, foi investigada em vários estudos observacionais, os quais reportaram evidências de que os dois modos climáticos mais importantes são as fases quente e fria do El Niño-Oscilação Sul (ENOS) no Oceano Pacífico Tropical (HASTENRATH, 1976; KOUSKY et al., 1984; KAYANO et al., 1988; RAO e HADA, 1990; COELHO et al., 1999; DE SOUZA et al., 2000; COELHO, UVO e AMBRIZZI, 2002; SOUZA e AMBRIZZI, 2002) e as fases do gradiente meridional de anomalias de temperatura da superfície do mar (TSM) no Oceano Atlântico tropical (NOBRE e SHUKLA, 1996; DE SOUZA et al., 1998; DE SOUZA et al., 2005; RONCHAIL et al., 2002).

Em uma revisão de literatura, Coutinho et al. (2017), Marengo et al. (2013) e Philipps et al. (2009) reportaram que a maioria dos estudos sobre extremos climáticos na Amazônia enfatizaram os impactos nos regimes hidrológicos, ou seja, as consequências da variabilidade pluviométrica nos níveis dos principais rios amazônicos. Outros estudos como os de Moraes et al. (2005), Silva Ferreira et al. (2015) e Sousa et al. (2015) revelaram resultados sobre a distribuição espaço-temporal da precipitação, considerando as circunscrições estaduais através das análises de dados dispostos em pontos de grade. Os efeitos dos eventos extremos de precipitação em escalas menores, como a municipal, ainda são pouco investigados (ESTEVES, 2011; SANTOS e ROCHA, 2013).

O conhecimento sobre a variabilidade pluviométrica e a ocorrência de extremos em localidades de menor extensão territorial é relevante para fins de aplicação no planejamento de órgãos como as Defesas Civis municipais, para a gestão regional dos riscos ambientais e para a mitigação dos impactos de secas/enchentes nas populações vulneráveis. O estado do Pará, localizado no leste da Amazônia, será o alvo desta pesquisa por sua extensão territorial, quantidade de municípios, população total e por abrigar importantes setores da economia para o PIB nacional. Assim sendo, o presente estudo tem como

ISSN: 2237-8642 (Eletrônica)

objetivo investigar quantitativamente com base na metodologia do SPI, a frequência dos extremos climáticos secos e chuvosos no estado do Pará, considerando como unidade de análise a escala municipal, em um período de 18 anos (1998 a 2015). Adicionalmente, serão analisados os modos de variabilidade tropicais dos Oceanos Pacífico e Atlântico associados à ocorrência dos distintos eventos extremos de precipitação.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 ÁREA DE ESTUDO E DADOS METEOROLÓGICOS

O domínio geográfico definido para a pesquisa é o estado do Pará, localizado no leste da Amazônia. Com uma população de, aproximadamente, 8 milhões de habitantes em 2019, é a segunda maior unidade federativa do país, com uma área de 1.247.955 km² (Figura 1). Quando comparada com a área do Brasil (8.515.759 km²) e da Amazônia Legal (5.020.000 km²), corresponde a cerca de 15% e 25%, respectivamente (IBGE, 2019). Destaca-se no mapa do estado, a delimitação dos 143 municípios, nos quais serão investigados os eventos extremos de precipitação.

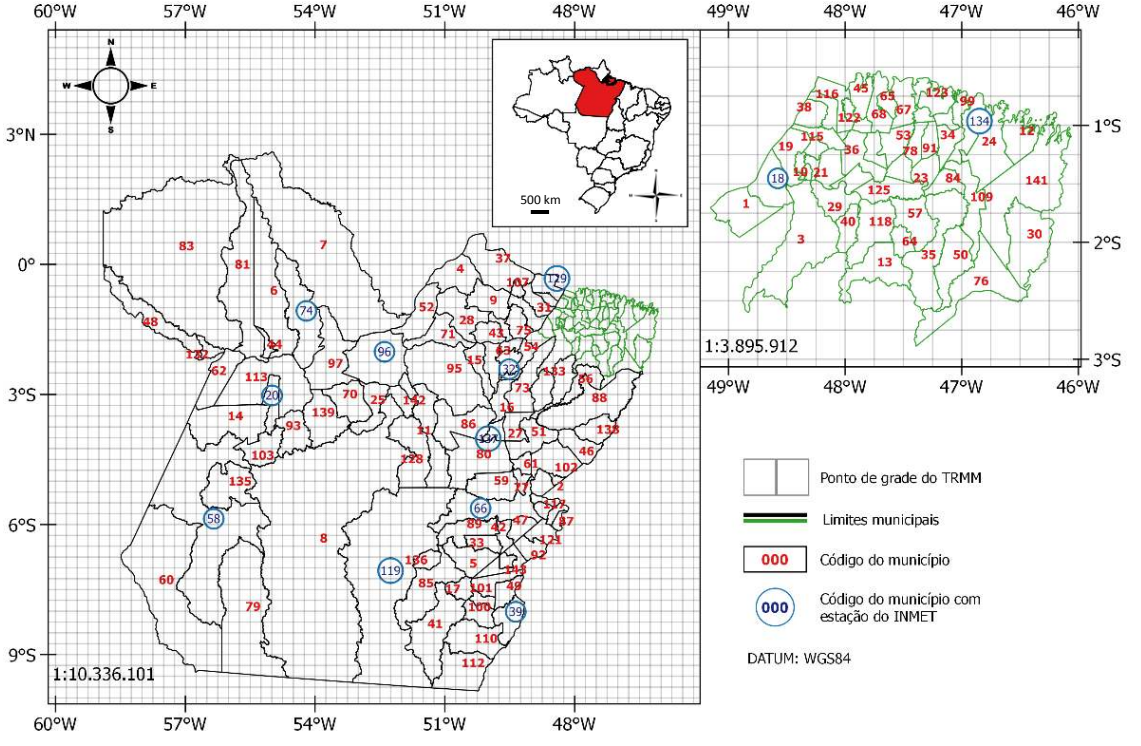

Figura 1 - Localização do estado do Pará e seus 143 municípios, numerados por códigos em vermelho e azul (com as estações meteorológicas do INMET). Os nomes dos municípios podem ser visualizados na Tabela 1. Fonte: IBGE (2013).

No estado do Pará, a temperatura média anual é superior a 26°C e o clima predominante é o de monção, com algumas regiões caracterizadas por não possuírem estação seca (ALVARES et al., 2013). A precipitação no estado é modulada pela atuação da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) nos meses de outono austral (DE SOUZA et al., 2005; SILVA FERREIRA et al. 2015), pela

ISSN: 2237-8642 (Eletrônica)

Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) nos meses de verão austral (CARVALHO et al., 2004) e, na transição do período chuvoso para o período seco é comum a presença de Linhas de Instabilidade (LI) formadas pela circulação de brisa na faixa litorânea e propagando-se para o interior do estado (COHEN et al., 1995).

Para ilustrar o padrão sazonal da precipitação no estado do Pará, a Figura 2 mostra a distribuição mensal da precipitação (de 1990 a 2019) em quatro estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), localizadas no oeste (Óbidos), sudoeste (Itaituba), nordeste (Belém) e sudeste (Conceição do Araguaia) paraense. Em geral, evidencia-se que os maiores acumulados pluviométricos ocorrem entre os meses de dezembro e maio, os quais se associam ao regime chuvoso, enquanto os menores valores ocorrem entre junho e novembro, denotando o regime seco na região.

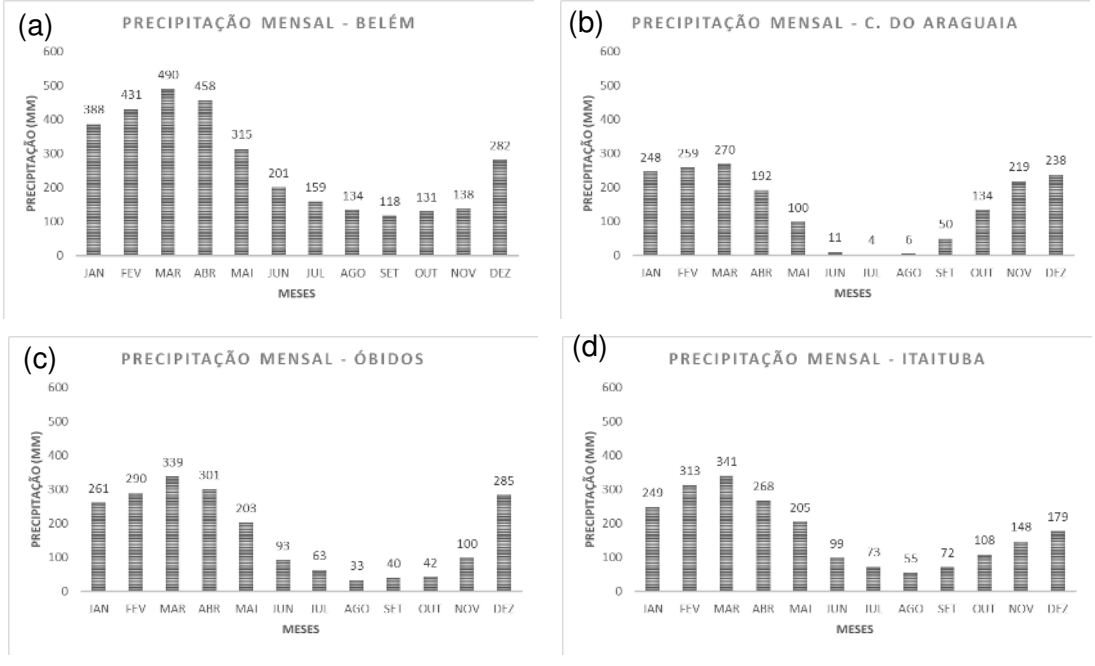

Figura 2 - Distribuição mensal (1990 a 2019) da precipitação nas estações meteorológicas do INMET em (a) Belém, (b) Conceição do Araguaia, (c) Óbidos e (d) Itaituba.

Utilizam-se os dados da última versão das estimativas do satélite Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) (KUMMEROW et al., 2000; HUFFMAN e BOLVIN, 2013), cuja resolução horizontal de 0,25° (em torno de 28 km) é adequada para análises da precipitação na escala municipal. A Figura 1 mostra a grade do TRMM com resolução de 0,25° (quadrículas na cor cinza), com os limites geográficos dos municípios do Pará. Os números na cor vermelha destacados na Figura 1 e também descritos na Tabela 1, correspondem aos municípios e os números em azul, circulados na mesma cor, representam as localidades onde há estação meteorológica do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). No canto superior direito, pode ser observado o mapa ampliado dos municípios localizados na porção nordeste do estado, cujas dimensões territoriais são menores.

ISSN: 2237-8642 (Eletrônica)

Para este estudo foram extraídos os dados de precipitação na escala municipal, ou seja, foi calculada a média espacial dos pontos de grade que englobam cada um dos 143 municípios do estado do Pará (não incluído Mojuí dos Campos, que foi emancipado em 2013). Em alguns municípios, devido apresentarem área bem menor, especialmente aqueles situados na porção nordeste, o cálculo foi feito considerando apenas um ponto de grade. Assim, foram obtidos os dados de precipitação para todos os municípios do Pará no período de janeiro de 1998 a dezembro de 2015 (18 anos de dados mensais). A listagem dos 143 municípios do Pará encontra-se na Tabela 1.

Tabela 1 - Códigos e nomes dos respectivos municípios do estado do Pará, detalhados espacialmente na Figura 1.

Código	Nome	Código	Nome	Código	Nome
1	Abaetetuba	51	Goianésia do Pará	101	Rio Maria
2	Abel Figueiredo	52	Gurupá	102	Rondon do Pará
3	Acará	53	Igarapé-Açú	103	Rurópolis
4	Afuá	54	Igarapé-Miri	104	Salinópolis
5	Água Azul do Norte	55	Inhangapi	105	Salvaterra
6	Alenquer	56	Ipixuna do Pará	106	Santa Bárbara do Pará
7	Almeirim	57	Irituia	107	Santa Cruz do Arari
8	Altamira	58	Itaituba	108	Santa Isabel do Pará
9	Anajás	59	Itupiranga	109	Santa Luzia do Pará
10	Ananindeua	60	Jacareacanga	110	Santa Maria das Barreiras
11	Anapú	61	Jacundá	111	Sta Maria do Pará
12	Augusto Corrêa	62	Juruti	112	Santana do Araguaia
13	Aurora do Pará	63	Limoeiro do Ajuru	113	Santarém
14	Aveiro	64	Mãe do Rio	114	Santarém Novo
15	Bagre	65	Magalhães Barata	115	Sto Antônio do Tauá
16	Baião	66	Marabá	116	S. Caetano de Odivelas
17	Bannach	67	Maracanã	117	S. Domingos do Araguaia
18	Barcarena	68	Marapanim	118	São Domingos do Capim
19	Belém	69	Marituba	119	São Félix do Xingú
20	Belterra	70	Medicilândia	120	São Francisco do Pará
21	Benevides	71	Melgaço	121	São Geraldo do Araguaia
22	Bom J. do Tocantins	72	Mocajuba	122	São João da Ponta
23	Bonito	73	Moju	123	São João de Pirabas
24	Bragança	74	Monte Alegre	124	São João do Araguaia
25	Brasil Novo	75	Muaná	125	São Miguel do Guamá
26	Brejo G. do Araguaia	76	Nova Esperança Piriá	126	S Sebastião da Boa Vista
27	Breu Branco	77	Nova Ipixuna	127	Sapucaia
28	Breves	78	Nova Timboteua	128	Senador José Porfírio
29	Bujaru	79	Novo Progresso	129	Soure
30	Cachoeira do Piriá	80	Novo Repartimento	130	Tailândia
31	Cachoeira do Arari	81	Óbidos	131	Terra Alta

32	Cametá	82	Oeiras do Pará	132	Terra Santa
33	Canaã dos Carajás	83	Oriximiná	133	Tomé-Açú
34	Capanema	84	Ourém	134	Tracuateua
35	Capitão Poço	85	Ourilândia do Norte	135	Trairão
36	Castanhal	86	Pacajá	136	Tucumã
37	Chaves	87	Palestina do Pará	137	Tucuruí
38	Colares	88	Paragominas	138	Ulianópolis
39	Conc. do Araguaia	89	Parauapebas	139	Uruará
40	Concórdia do Pará	90	Pau D'Arco	140	Vigia
41	Cumaru do Norte	91	Peixe-Boi	141	Viseu
42	Curionópolis	92	Piçarra	142	Vitória do Xingú
43	Curralinho	93	Placas	143	Xinguara
44	Curuá	94	Ponta de Pedras		
45	Curuçá	95	Portel		
46	Dom Eliseu	96	Porto de Moz		
47	Eldorado dos Carajás	97	Prainha		
48	Faro	98	Primavera		
49	Floresta do Araguaia	99	Quatipuru		
50	Garrafão do Norte	100	Redenção		

Fonte: IBGE (2013).

Embora as resoluções no espaço e tempo da base de precipitação do satélite TRMM possam ser consideradas adequadas para a presente proposta de pesquisa, é conveniente realizar uma análise de comparação e validação quantitativa entre os dados gerados pelo TRMM e os registros observacionais das 12 estações meteorológicas do INMET disponíveis no estado do Pará, as quais são destacadas por um círculo em azul na Figura 1. De modo geral, os resultados das correlações entre os dados do TRMM e as estações do INMET indicaram consistência alta entre as séries temporais de precipitação considerando as médias anuais e as médias sazonais dos regimes chuvoso e seco. A Tabela 2 mostra que, embora os valores do coeficiente de correlação tenham sido abaixo de 0,80 em alguns casos, a série histórica apresentou correlação acima de 90% na maioria das estações, evidenciando que ambas as séries se comportam de modo similar, isto é, as estimativas de precipitação do TRMM são consistentes com os registros pluviométricos da rede observacional de estações do INMET no estado do Pará. Portanto, os dados do TRMM podem ser utilizados na caracterização do clima atual no estado do Pará. Ressalta-se que todas as estações meteorológicas utilizadas apresentaram percentual de falhas inferior a 5%.

ISSN: 2237-8642 (Eletrônica)

Tabela 2 - Coordenadas geográficas das estações meteorológicas convencionais do INMET e coeficiente de correlação de Pearson (ρ) com a base de precipitação do TRMM para dados anuais, período seco, chuvoso e série histórica.

Código OMM	Município / Estação INMET	Coordenada Geográfica	Altitude (m)	ρ (anual)	ρ (seco)	ρ (chuvoso)	ρ (série)
82191	Belém	1,43°S / 48.43°W	7,13	0,52	0,56	0,71	0,90
82246	Belterra	2,64°S / 54,94°W	164,3	0,95	0,83	0,90	0,95
82263	Cametá	2,24°S / 49,50°W	9,93	0,80	0,72	0,82	0,89
82861	C. do Araguaia	8,26°S / 49,26°W	179,02	0,90	0,92	0,90	0,95
82445	Itaituba	4,28°S / 55,99°W	24,5	0,92	0,84	0,83	0,95
82562	Marabá	5,37°S / 49,13°W	101,66	0,82	0,78	0,88	0,95
82181	Monte Alegre	2,00°S / 54,08°W	100,52	0,78	0,76	0,87	0,95
82184	Porto de Moz	1,75°S / 52,24°W	13,08	0,86	0,84	0,86	0,95
82668	S. F. do Xingu	6,63°S / 51,98°W	195,98	0,86	0,87	0,79	0,95
82141	Soure	0,73°S / 48,52°W	12,6	0,83	0,88	0,86	0,95
82145	Tracuateua	1,06°S / 46,87°W	24,68	0,91	0,92	0,93	0,95
82361	Tucuruí	3,76°S / 49,67°W	27,83	0,83	0,86	0,85	0,95

2.2 SELEÇÃO E DETERMINAÇÃO DA FREQUÊNCIA DE EXTREMOS CLIMÁTICOS

Para a determinação de extremos climáticos, foi realizado o cálculo do *Standard Precipitation Index* (SPI, da sigla em inglês), empregado nos dados municipais de precipitação. No cálculo do SPI, conforme McKee, Doesken e Kleist (1993), ajusta-se a série de dados históricos para uma distribuição gama (Equação 1), adequada aos dados mensais de precipitação, através de um processo de estimativa de máxima verossimilhança dos parâmetros de distribuição gama, α e β. Em termos simples, este processo permite que a distribuição da precipitação em uma área seja efetivamente representada por uma função de probabilidade cumulativa matemática dado pela expressão:

$$g(x) = \frac{X^{\alpha-1}.e^{-x/\beta}}{\beta^{\alpha}\Gamma(\alpha)} \; para \; X > 0 \qquad (1)$$

Em que: α> 0 é o parâmetro de forma; β > 0 é o parâmetro de escala; x > 0 é a quantidade de precipitação em milímetros (mm) e Γ(α) representa a função gama completa.

As estimativas de α e β são dadas pelas Equações 2 e 3:

$$\alpha = \frac{1}{4A}\left(1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}}\right) \qquad (2)$$

$$\beta = \frac{\overline{x}}{\alpha} \qquad (3)$$

Em que $\bar{x}$ é a precipitação média.

ISSN: 2237-8642 (Eletrônica)

$$A = \ln \bar{x} - \frac{\sum \ln x}{n} \quad (4)$$

Sendo n o número de observações, temos a distribuição de probabilidade normal, a partir da distribuição cumulativa. A probabilidade acumulada de ocorrência de cada valor é estimada e aplicada na função normal inversa para encontrar o valor de SPI, que nada mais é do que a diferença da precipitação observada e a média em um dado intervalo de tempo, pela razão do desvio padrão (Equação 5).

$$SPI = Z_i = \frac{(P_i - \bar{P}_i)}{\sigma_i} \quad (5)$$

Em que, P_i é a precipitação observada, $\bar{P}_i$ e σ_i são, respectivamente, a média e o desvio padrão da série ajustada. Segundo McKee, Doesken e Kleist (1993), os valores quantitativos de SPI podem ser caracterizados para cada escala de tempo, sendo que os valores que ultrapassam a magnitude de 1,5, em módulo, podem ser definidos como eventos extremos. Logo, neste trabalho, o extremo climático chuvoso (ExtCHU) é definido quando o SPI ultrapassa o valor de +1,5, enquanto o extremo climático seco (ExtSEC) é definido quando o SPI é inferior ao valor de -1,5. Esses limiares foram definidos por McKee, Doesken e Kleist (1993) como eventos severos e também foram usados por Santos et al. (2017) em estudos de extremos para a Amazônia.

Tais valores de SPI, tomados como indicativo de ocorrência dos extremos, foram contabilizados para cada mês, em cada município entre 1998 a 2015 e, em seguida, foi calculada a frequência relativa (Equação 6) dos ExtCHU e ExtSEC usando a expressão (Equação 6):

A frequência relativa F_R é definida como o quociente entre a frequência simples F_i e o total de dados n. O valor de F_i é dado pela quantidade de vezes que um determinado evento se repete ao longo do tempo e n é o número total de amostras, conforme abaixo:

$$F_i = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + \cdots + F_n$$
$$F_R = \frac{F_i}{n} \quad (6)$$

Os resultados foram agregados considerando as escalas anual e sazonal para os períodos de dezembro, janeiro e fevereiro (DJF), março, abril e maio (MAM), junho, julho e agosto (JJA) e setembro, outubro e novembro (SON).

2.3 AVALIAÇÃO DOS MODOS CLIMÁTICOS ASSOCIADOS AOS EXTREMOS DE PRECIPITAÇÃO

Para a determinação da estrutura dinâmica dos padrões oceano-atmosfera e identificação dos mecanismos climáticos associados, foram utilizados dados de temperatura da superfície do mar (TSM), cujos padrões de anomalias nos Oceanos Pacífico e Atlântico modulam o clima regional no Pará

(NOBRE e SHUKLA, 1996; DE SOUZA et al., 2002; DE SOUZA et al., 2004; DE SOUZA et al., 2005; SILVA FERREIRA et al., 2015). Os dados de TSM têm espaçamento de grade de 1° em latitude e longitude, cobrindo todo o globo terrestre com atualizações diárias e mensais desde 1979 (REYNOLDS et al., 2007).

Também foram utilizados dados de estimativas de Radiação de Onda Longa (ROL) para identificar a convecção na faixa tropical da América do Sul (LIEBMANN e SMITH, 1996) e caracterizar os padrões de nebulosidade de meso e grande escala. Tais informações possuem resolução espacial de 2,5° em latitude e longitude e são provenientes dos satélites em órbita polar do National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA).

Para analisar a estrutura horizontal da troposfera em baixos (850hPa) e altos níveis (200hPa), foram empregados dados de reanálises da NOAA, referentes a componente zonal e meridional do vento, pela composição das componentes divergentes do vento (KALNAY et al., 1996). Tais vetores são essenciais para estudos atmosféricos de convergência/divergência que modulam o movimento vertical e a circulação nos trópicos (DE SOUZA et al., 2004; HASTENRATH, 2001).

A ferramenta computacional utilizada para o tratamento dos dados foi o Grid Analysis and Display System (GrADS), que é um software interativo em linguagem script para processamento de cálculos e visualização gráfica dos dados climáticos. Para a confecção de alguns mapas foi utilizado o QGIS, um software livre com código-fonte aberto multiplataforma de sistema de informação geográfica (SIG) que permite a visualização, edição e análise de dados georreferenciados.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 CONFIGURAÇÃO ESPACIAL DA PRECIPITAÇÃO CLIMATOLÓGICA E DOS EXTREMOS CLIMÁTICOS

A Figura 3 mostra a distribuição espacial da precipitação pluviométrica (média de 1998 a 2015) anual e sazonal (DJF, MAM, JJA e SON) para os municípios do Pará.

Considerando a média anual (Fig. 3a), observa-se a presença de variabilidade espacial pronunciada ao longo do estado com pluviometria variando entre 1650 e 3150 mm. Destaca-se a área no setor norte/norte apresentando valores máximos (acima de 2550 mm, municípios em tons de azul) principalmente em Belém, Acará, Moju, Anajá e Breves. Notam-se localidades com valores intermediários (2100 a 2550 mm, toms de verde) espalhados pela região, como no extremo nordeste (Bragança, Cachoeira do Piriá, Garrafão do Norte e Nova Esperança do Piriá), oeste da ilha de Marajó (Afuá e Gurupá), porção central (Pacajá, Tucuruí, Breu Branco, entre outros) e oeste (Terra Santa, Oriximiná, Faro, Juruti, Aveiro, Rurópolis, Jacareacanga) na divisa com o Amazonas. Notam-se também diversos municípios com total anual relativamente menor (1650 a 1950 mm, tons de marrom) na faixa norte/centro/sul (Óbidos, Santarém, Alenquer, Monte Alegre, Altamira e Senador José Porfírio) e porção sudeste (São Félix do Xingu, Ulianópolis,

ISSN: 2237-8642 (Eletrônica)

Marabá, Parauapebas, Canaã dos Carajás, Curionópolis, Ourilândia do Norte, Piçarra, Sapucaia, São Geraldo do Araguaia e Xinguara).

Analisando a distribuição sazonal da precipitação no estado, as Figuras 3b e 3c mostram que os períodos mais chuvosos são DJF e MAM. O trimestre DJF apresenta máximos em regiões distintas, uma ao norte (ilha de Marajó e municípios vizinhos) e outra no extremo sudoeste (Itaituba, Jacareacanga e Novo Progresso). Este último máximo associa-se diretamente a atuação da ZCAS, que é o principal sistema atmosférico atuante na América do Sul no verão do Hemisfério Sul. A ZCAS organiza-se horizontalmente como uma banda nebulosidade orientada de noroeste a sudeste do Brasil, desde o centro-sul da Amazônia até o Oceano Atlântico tropical sul (CARVALHO et al., 2004 e CHAVES et al., 2004). Essa disposição espacial induz precipitação significativa na porção sudoeste/sul/sudeste do Pará, como constatado na Figura 3b. No trimestre MAM (Fig. 3c), os máximos pluviométricos (acima de 1025 mm) ficam restritos à porção norte, desde o noroeste paraense (Oriximiná, Faro e Juruti), os municípios da ilha de Marajó (exceto Anajás e Gurupá), parte daqueles na porção central (Pacajá, Tucuruí e Anapu, por exemplo), até a porção nordeste (Belém, Ananindeua, Barcarena, Colares, Vigia, Maracanã, Tailândia, Cametá, Igarapé-Açu entre outros). Neste período tem-se a banda de nebulosidade associada à ZCIT atingindo sua posição mais austral e atuando como fator preponderante para que os maiores acumulados pluviométricos ocorram em grande parte do estado (SILVA FERREIRA et al., 2015).

Os períodos sazonais mais secos no Pará ocorrem em JJA e SON. Uma característica que distingue estes trimestres é a configuração de uma grande área contendo valores mínimos (abaixo de 155 mm, tons de marrom escuro) sobre a porção centro-sul-sudeste em JJA e na porção norte/nordeste/leste em SON, conforme mostram as Figuras 3d e 3e. Durante este período, verifica-se o predomínio de um centro de alta pressão na porção central do Brasil, o qual é resultante da intensificação do ramo subsidente da Célula de Hadley (COELHO et al., 1999; MARENGO et al., 2008). Essa configuração atmosférica inibe a formação de nebulosidade tropical profunda e reduz consequentemente a precipitação nos municípios localizados no sul do Pará. O extremo norte do Pará experimenta o período mais seco em SON, em associação a posição da ZCIT no Hemisfério Norte e ocorrência de subsidência ao norte da Amazônia (COELHO et al., 1999).

A distribuição espacial dos padrões sazonais de precipitação no estado do Pará é coerente com estudos similares, como os de Moraes et al. (2005) e Lopes et al. (2013), que estudaram a climatologia e a variação espaço-temporal da precipitação no Pará. Em ambos os estudos, foi encontrado que os meses mais chuvosos se concentram entre o verão e outono do Hemisfério Sul, enquanto que os meses mais secos se restringem os meses de inverno e primavera. Os máximos pluviométricos se associam a atuação da ZCIT, que apresenta a sua posição mais austral entre fevereiro e abril (DE SOUZA et al., 2005; SILVA FERREIRA et al., 2015) e os menores valores se relacionam a intensificação do ramo subsidente da Célula de Hadley, que historicamente ocorre entre julho e agosto (COELHO et al., 1999; MOLION, 1987).

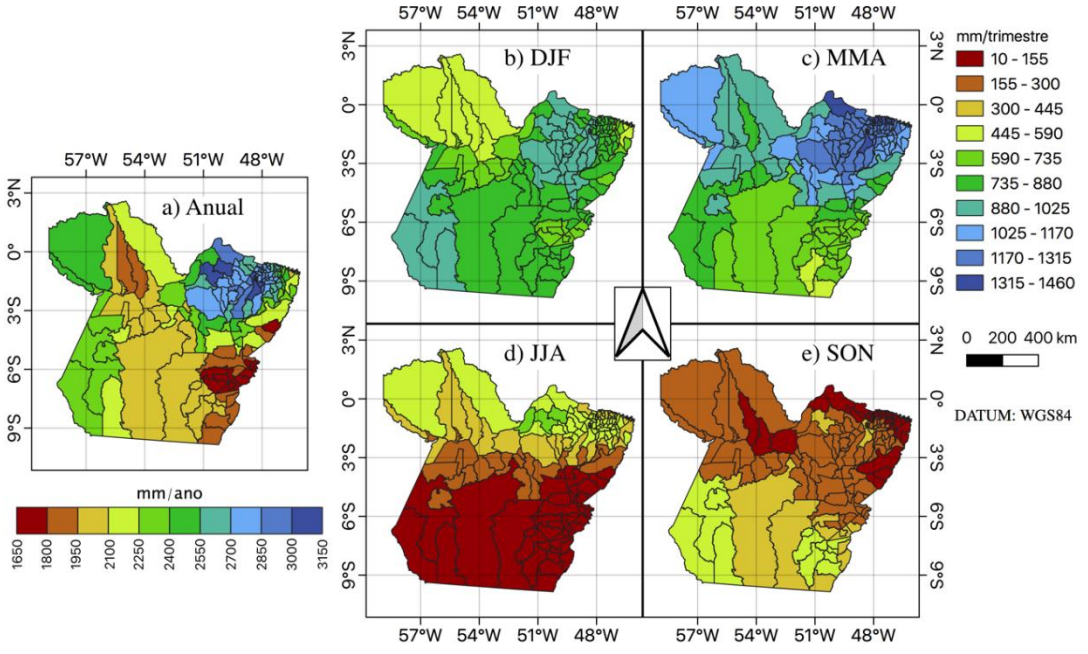

Figura 3 - Climatologia (média 1998 a 2015) da precipitação nos municípios do estado do Pará para (a) média anual e médias sazonais para (b) DJF, (c) MAM, (d) JJA e (e) SON. A escala de cores indica a magnitude em mm.

Os resultados da aplicação do SPI nos dados municipais de precipitação, bem como a frequência relativa dos ExtSEC e ExtCHU no Pará considerando a média anual e sazonal (DJF, MAM, JJA e SON) são mostrados nas Figuras 4 e 5, respectivamente.

Na média anual da frequência de extremos climáticos ilustrada na Figura 4, verifica-se uma variação entre 2% e 8% para os ExtSEC e entre 8% e 12% para os ExtCHU, ou seja, a comparação da distribuição espacial revela que os extremos climáticos associados ao excesso de precipitação são mais frequentes do que os eventos com déficit pluviométrico nos municípios do Pará. Concernente ao padrão anual do ExtSEC (Fig. 4a), observam-se vários municípios apresentando frequências menores que 4%, distribuídos nos setores sudoeste (Jacareacanga), sudeste (Conceição do Araguaia, Redenção, Dom Eliseu, Rio Maria, Tucumã, entre outros), centro (Vitória do Xingu), oeste (Medicilândia, Uruará, Prainha e Juruti) e litoral (Viseu e Augusto Corrêa), enquanto que no restante do estado predominaram valores maiores, entre 4% e 8% (Oriximiná, Altamira, Moju e grande parte daqueles situados na ilha de Marajó).

Por outro lado, no mapa anual dos ExtCHU (Fig. 4b), destacam-se os munícipios apresentando frequência alta de 10% a 12% nas áreas noroeste (Oriximiná), sudeste (Cumaru do Norte, Ourilândia do Norte, Bannach, Redenção, Pau D'Arco, Rio Maria, Xinguara, Tucumã, Rondon do Pará, Abel Figueiredo e Nova Ipixuna) e nordeste/litoral (Aurora do Pará, São Miguel do Pará, Augusto Corrêa, Soure, Salvaterra entre outros). No restante dos municípios, foram observadas variações entre 6% e 8% distribuindo-se ao longo de todo o estado. Vale ressaltar que apenas Paragominas, Bagre, Oeiras do Pará e Cametá apresentaram frequência de ExtCHU abaixo de 6%.

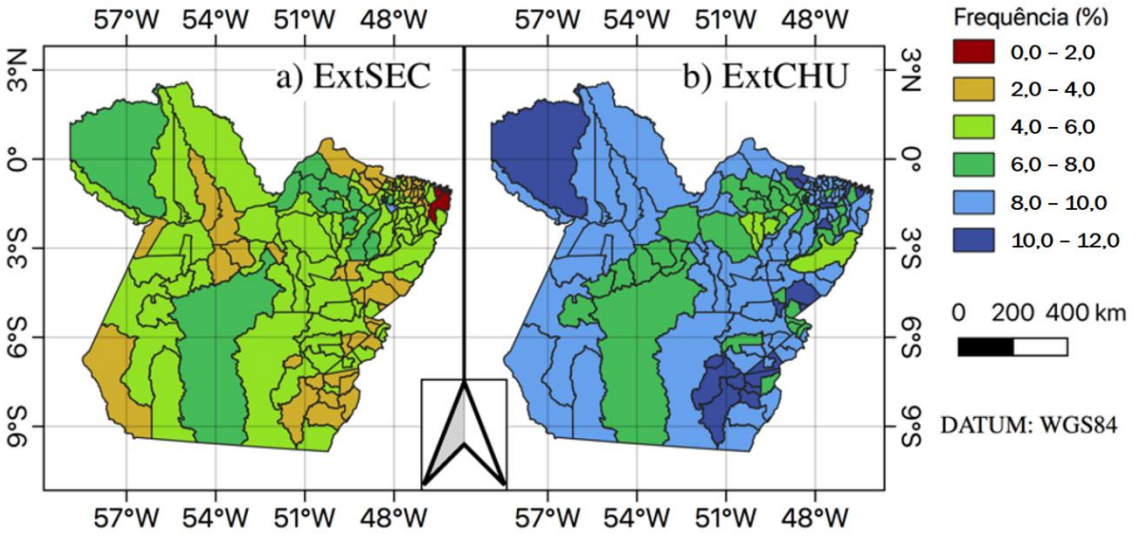

Figura 4 - Frequência anual dos Extremos Climáticos (a) ExtSEC e (b) ExtCHU nos municípios do estado do Pará, durante o período de 1998 a 2015. A escala de cores indica a magnitude em %.

A Figura 5 mostra os resultados da frequência sazonal dos ExtSEC e ExtCHU no Pará em DJF, MAM, JJA e SON.

Na configuração dos ExtSEC sobre o Pará (painel superior, Fig. 5a até 5d), evidencia-se uma grande área contendo municípios com frequência muito baixa (menor que 0,61%, tons de marrom) em grande parte do centro-sul-sudeste no trimestre de JJA e na porção nordeste-leste em SON. Essas frequências mínimas de ExtSEC em JJA e SON se deve ao histórico de precipitação que climatologicamente apresentam acumulados trimestrais baixos (ver Figura 3). Isso indica a menor a probabilidade de detectar valores associados a ExtSEC nos períodos em que a escassez pluviométrica é natural. Assim, em JJA verificam-se ExtSEC atingindo os municípios do extremo norte e notadamente do setor nordeste do Pará, enquanto que no trimestre SON, tais eventos extremos predominam nas localidades situadas no oeste/sul/sudeste do estado. Nos outros trimestres de DJF e MAM, verificam-se uma distribuição de ExtSEC bastante variada ao longo de todo o estado.

No padrão espacial da frequência de ExtCHU (painel inferior, Fig. 5e até 5h) verifica-se a ocorrência de eventos extremos se distribuindo regularmente durante os quatro trimestres do ano. Esses resultados assinalam que os eventos ExtCHU podem se manifestar independente da estação do ano e do valor pluvométrico climatológico sazonal. Portanto, tanto os sistemas meteorológicos de grande escala (ZCIT e ZCAS) como os de escala menor (Linhas de Instabilidade, Aglomerados convectivos) podem atuar em um determinado município resultando na ocorrência de ExtCHU ao longo do estado do Pará.

ISSN: 2237-8642 (Eletrônica)

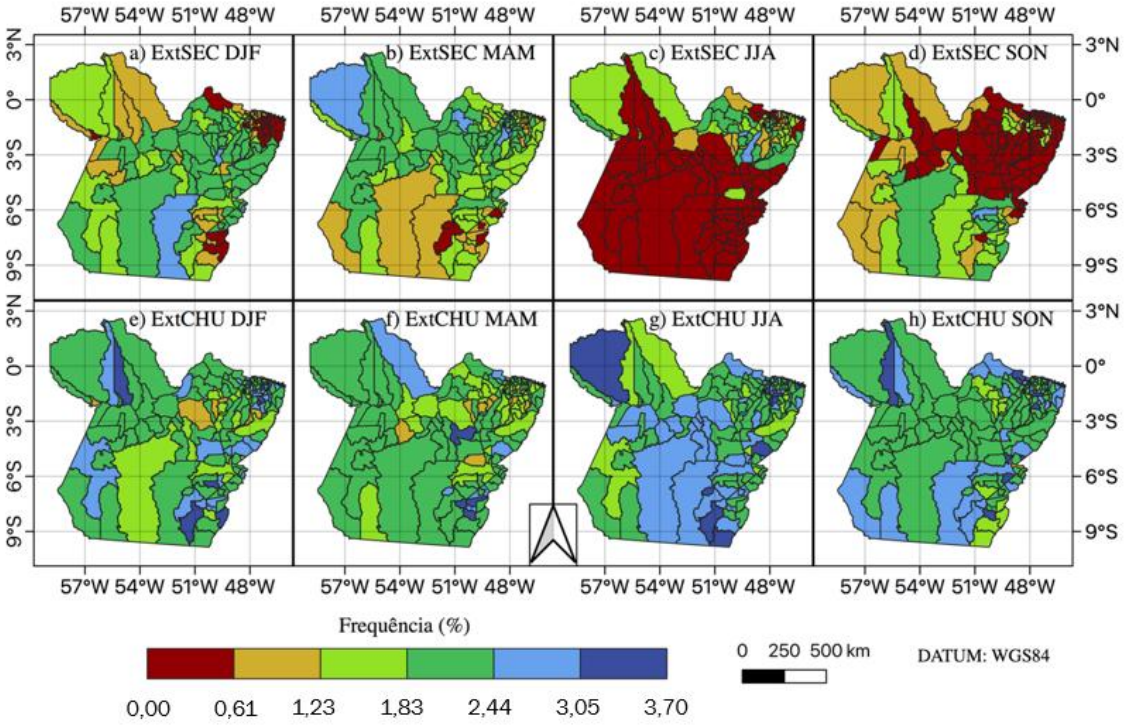

Figura 5 - Frequência sazonal de ExtSEC (5a até 5d) e ExtCHU (5e até 5h) nos municípios do estado do Pará, durante o período de 1998 a 2015. A escala de cores indica a magnitude em %.

3.2 VARIABILIDADE INTERANUAL E MODOS CLIMÁTICOS ATUANTES

A Tabela 3 mostra o número total de municípios do estado que registraram eventos ExtCHU e ExtSEC nos trimestres DJF, MAM, JJA e SON em cada ano, de 1998 a 2015. Notou-se grande variabilidade interanual entre os municípios afetados, considerando ambos extremos climáticos no período estudado. A fim de investigar a dinâmica dos modos climáticos atuantes em termos dos padrões oceânicos e atmosféricos que explicam a ocorrência destes extremos, foram selecionados os anos em que o número de municípios representou mais do que 55% do total do estado. Esse percentual foi escolhido empiricamente por corresponder a um pouco mais da metade (78) do total de municípios paraenses (143). Usando este critério em cada trimestre, a Tabela 3 destaca em negrito, os anos de ExtCHU e os anos de ExtSEC selecionados para a análise dos modos climáticos atuantes. Tais anos representam predominância de extremos chuvosos e secos atingindo grande parte do estado do Pará, os quais são usados para gerar as composições (médias dos anos selecionados nos respectivos trimestres) dos padrões anômalos das variáveis oceânicas e atmosféricas.

ISSN: 2237-8642 (Eletrônica)

Tabela 3 - Número total de municípios do Pará com registro de ExtCHU e ExtSEC por trimestre, no período de 1998 a 2015. Em negrito, os trimestres com mais de 55% dos municípios afetados pelos extremos climáticos (a partir de 78 municípios).

	ExtCHU				ExtSEC			
	DJF	MAM	JJA	SON	DJF	MAM	JJA	SON
1998	0	0	21	60	52	**131**	36	3
1999	5	58	10	**87**	44	8	**91**	1
2000	**131**	61	**115**	**113**	0	6	1	3
2001	**98**	4	48	18	7	**79**	13	60
2002	7	3	14	2	52	75	67	**83**
2003	34	10	44	31	41	69	40	23
2004	72	2	68	14	4	**85**	8	47
2005	3	25	0	10	**104**	39	**109**	**78**
2006	**87**	**109**	7	**96**	4	0	**78**	20
2007	1	11	12	**79**	68	52	67	44
2008	**81**	69	43	18	7	29	47	22
2009	41	**136**	37	0	14	1	14	**120**
2010	10	5	55	25	72	**117**	41	29
2011	**81**	**89**	39	**88**	1	1	17	17
2012	10	4	34	7	**99**	**116**	16	**114**
2013	19	69	**85**	**80**	60	3	1	25
2014	70	**87**	43	37	5	18	48	41
2015	0	59	3	0	**104**	44	**88**	**143**

As Figuras 6, 7, 8 e 9 mostram as composições correspondentes aos ExtSEC (figuras à esquerda) e ExtCHU (figuras à direita) nos trimestres de DJF, MAM, JJA e SON, respectivamente. As variáveis mapeadas representam anomalias (médias dos anos selecionados na Tabela 3, subtraídas da média de todo o período).

Foram analisados os padrões anômalos de TSM (°C), vento divergente (m/s) e velocidade potencial (CHI em m²/s²) em baixos níveis (850hPa) no domínio que engloba o Oceano Pacífico, América do Sul e Oceano Atlântico (figuras na parte superior), Radiação de Onda Longa (ROL em W/m²), vento divergente (V_{DIV}, valor de referência de 2 m/s) e CHI (m²/s²) em altos níveis (200hPa) sobre a América do Sul (figuras na parte intermediária) e o índice SPI da precipitação (figuras na parte inferior) no estado do Pará, destacando valores acima de +1 desvio padrão (chuva acima da média) e abaixo de -1 desvio padrão (chuva abaixo da média).

Na composição de DJF (Figura 6) evidenciaram-se padrões de TSM, ROL e de vento nos baixos e altos níveis essencialmente inversos quando se comparam os resultados do ExtSEC com os do ExtCHU. Para os ExtSEC (Fig. 6, painel à esquerda), observou-se a predominância de anomalias positivas de TSM

ISSN: 2237-8642 (Eletrônica)

(águas oceânicas mais quentes do que o normal) sobre a bacia do Oceano Pacífico equatorial, indicativo da presença do modo climático El Niño. Sobre o Oceano Atlântico notou-se um padrão inverso com anomalias positivas na bacia norte e negativas na bacia sul, cuja configuração resulta em um padrão de CHI negativo e vento divergente em baixos níveis atingindo o nordeste do Brasil (Figs. no painel superior). As anomalias positivas de ROL indicam inibição anômala da nebulosidade sobre uma grande área que abrange o Pará e Oceano Atlântico adjacente, com um padrão de CHI positivo e vento convergente em altos níveis (Figs. no painel intermediário). Em consequência, verificou-se um padrão de SPI negativo nos municípios do oeste, leste e nordeste do Pará (Figs. no painel inferior)

Por outro lado, para os ExtCHU (Fig. 6, painel à direita), notaram-se anomalias negativas de TSM (águas oceânicas mais frias do que o normal) sobre a bacia do Oceano Pacífico equatorial, indicando a manifestação do modo climático La Niña, enquanto que o Oceano Atlântico equatorial apresentou anomalias ligeiramente positivas, com um padrão de CHI positivo e vento convergente em baixos níveis (Figs. no painel superior). As anomalias negativas de ROL revelaram intensificação da nebulosidade tropical sobre o leste da Amazônia, com uma típica configuração da presença da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) sobre a região (Figs. no painel intermediário). Assim, o padrão de SPI foi positivo na maior parte dos municípios do estado do Pará (Figs. no painel inferior).

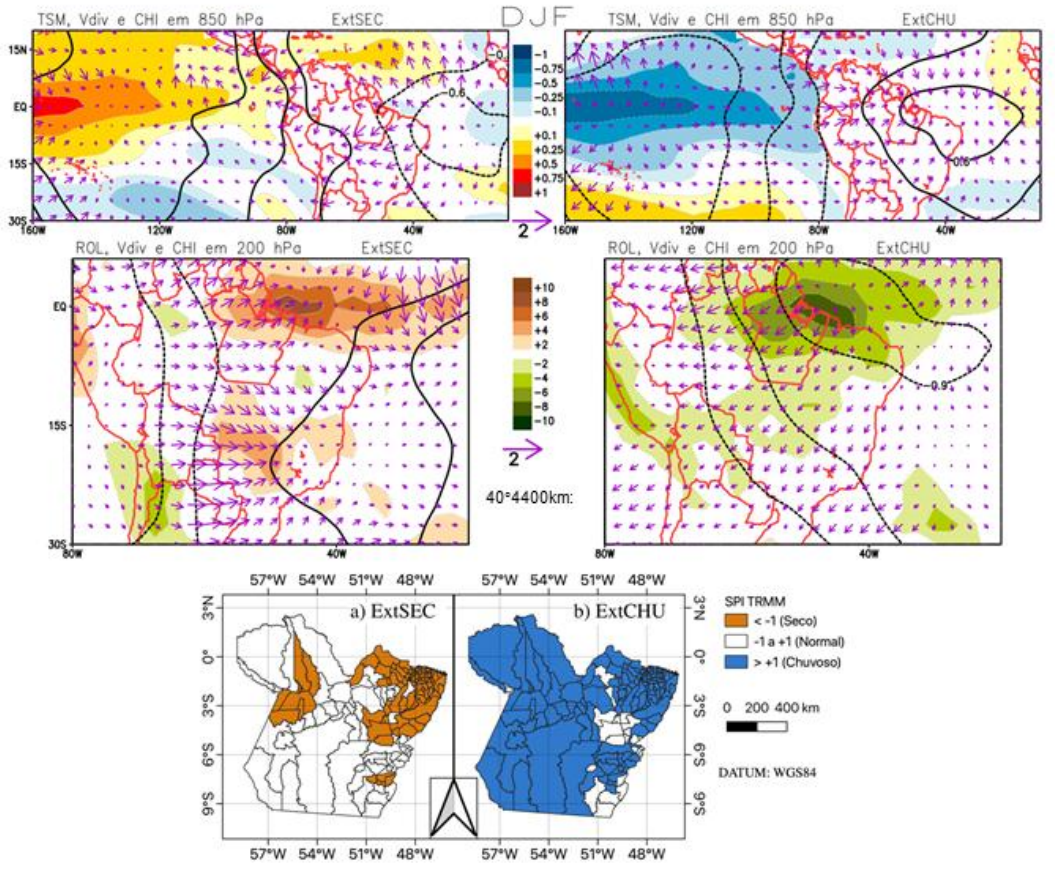

Figura 6 - Composições de anomalias das variáveis oceânicas e atmosféricas referentes aos ExtSEC e ExtCHU durante o trimestre DJF. A magnitude dos contornos sombreados de TSM, ROL e SPI são indicados nas escalas de cores entre as figuras.

Na composição de MAM da Figura 7, considerando os ExtSEC (Fig. 6, painel à esquerda), ainda é verificada a atuação do padrão de El Niño sobre o Oceano Pacífico, devido a presença de anomalias positivas de TSM, enquanto que no Atlântico norte a configuração de anomalias positivas é intensificada, resultando em um padrão de CHI positivo e vento convergente ao norte da bacia. As anomalias positivas de ROL também se fortalecem, ocasionando inibição significativa da nebulosidade sobre o Brasil tropical e adjacências do Atlântico equatorial, explicando a predominância de SPI negativo na maior parte dos municípios do Pará.

Em relação aos ExtCHU (Fig. 7, painel à direita), o padrão de resfriamento oceânico associado a La Niña se enfraquece (anomalias negativas de TSM), porém a configuração de TSM no Atlântico é bem estabelecida, com anomalias negativas na bacia norte e positivas na bacia sul. Este padrão revela claramente a manifestação do modo gradiente de TSM apontando para o sul do equador, que é associado ao movimento da ZCIT em direção a latitudes negativas, como apontado pela extensa área contendo anomalias negativas de ROL cobrindo a Amazônia e Nordeste brasileiro. Consequentemente, grande parte dos municípios do Pará apresentam SPI positivo.

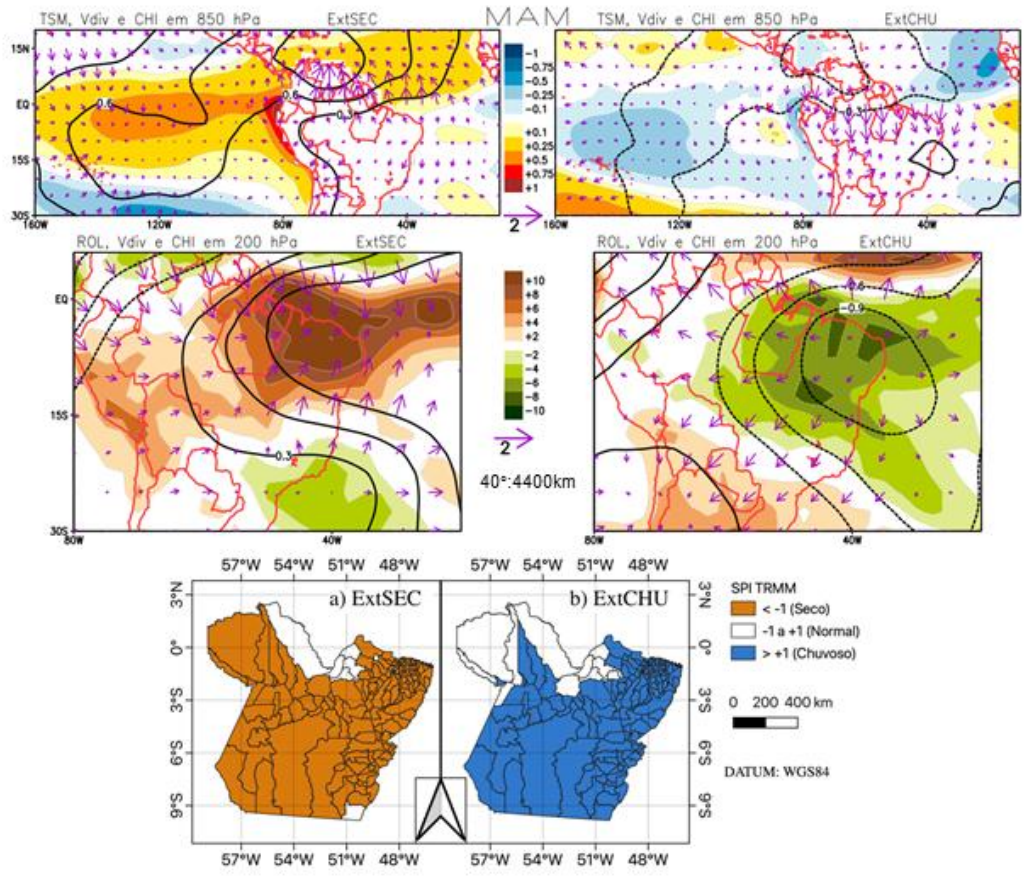

Figura 7 - Composições de anomalias das variáveis oceânicas e atmosféricas referentes aos ExtSEC e ExtCHU, para o trimestre MAM. A magnitude dos contornos sombreados de TSM, ROL e SPI são indicados nas escalas de cores entre as figuras.

Na composição de JJA (Figura 8), para os ExtSEC (Fig. 8, painel à esquerda) o padrão de TSM mostrou uma área contendo anomalia positiva de TSM no Pacífico equatorial e também no Atlântico tropical norte. O campo de vento divergente em baixos níveis e convergente em altos níveis associou-se à área positiva de anomalias ROL sobre o Pará, indicando a ausência de nebulosidade sobre a região, o que explica a presença de SPI negativo atingindo grande parte dos municípios do Pará.

Para os ExtCHU (Fig. 8, painel à direita), os Oceanos Pacífico tropical e o Atlântico equatorial apresentaram anomalias negativas de TSM. No campo de ROL observou-se uma grande região contendo anomalias negativas sobre a porção oeste da Amazônia estendendo-se à região nordeste, incluindo o estado do Pará. Estes padrões se relacionaram à ocorrência de SPI positivo em grande parte do estado.

ISSN: 2237-8642 (Eletrônica)

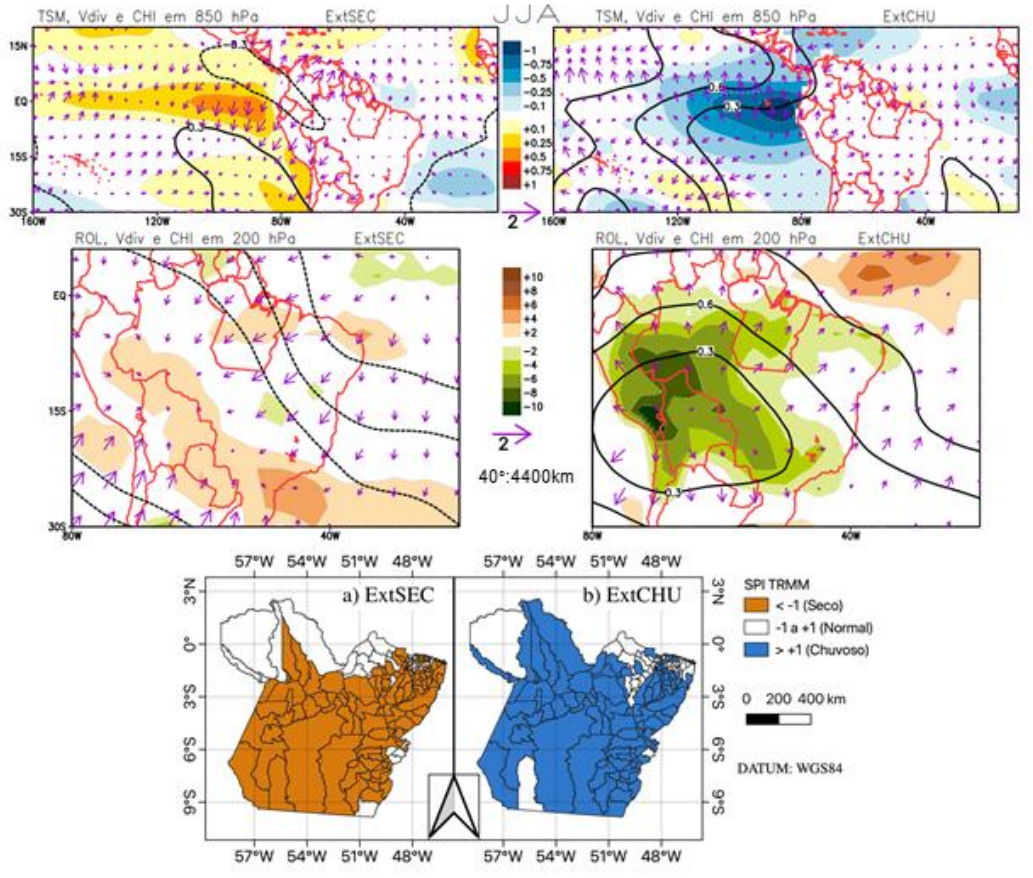

Figura 8 - Composições de anomalias das variáveis oceânicas e atmosféricas referentes aos ExtSEC e ExtCHU durante o trimestre JJA. A magnitude dos contornos sombreados de TSM, ROL e SPI são indicados nas escalas de cores entre as figuras.

Na composição de SON (Figura 9), para os ExtSEC (Fig. 9, painel à esquerda), ressalta-se o padrão de acentuadas anomalias positivas de TSM, associadas ao El Niño sobre o Oceano Pacífico tropical, o qual provoca o aparecimento de uma grande área com CHI negativo e vento divergente em baixos níveis, bem como um padrão de ROL positivo (inibição de nuvens) e vento convergente em altos níveis sobre a Amazônia, explicando a predominância de SPI negativo sobre mais de 97% dos municípios paraenses.

Para os ExtCHU (Fig. 9, painel à direita), o campo de TSM indicou a presença de anomalias negativas de TSM sobre o Oceano Pacífico tropical e em grande parte do Oceano Atlântico. Observou-se uma área de CHI positivo com convergência do vento em baixos níveis e divergência em altos níveis, favorecendo a formação de nebulosidade acima do normal sobre a Amazônia, cujos padrões explicam o SPI positivo na maior parte dos municípios do Pará.

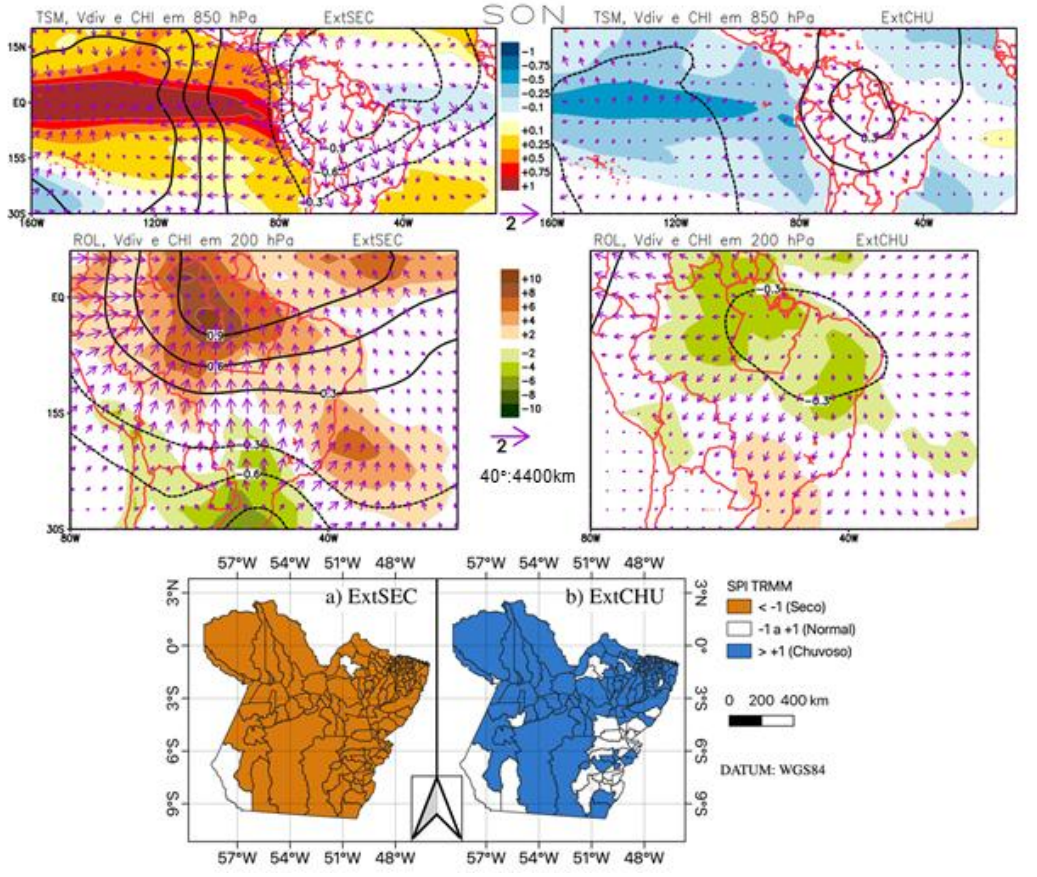

Figura 9 - Composições de anomalias das variáveis oceânicas e atmosféricas referentes aos ExtSEC e ExtCHU durante o trimestre SON. A magnitude dos contornos sombreados de TSM, ROL e SPI são indicados nas escalas de cores entre as figuras.

De um modo geral, os trimestres em que os municípios experimentaram ExtSEC foi evidenciado um padrão de aquecimento das águas superficiais no Oceano Pacífico equatorial, associados ao modo climático El Niño. Tais anomalias de TSM foram observadas em todos os trimestres, porém mais acentuadas em SON. De acordo com Trenberth (1997) e De Souza et al. (2002), o período marca início do estabelecimento do mecanismo climático ENOS (El Niño Oscilação Sul). Concomitantemente, no Oceano Atlântico o predomínio foi de um gradiente inter-hemisférico de anomalias de TSM apontando para o norte, ou seja, induzindo o posicionamento da ZCIT acima da linha do equador. A configuração de vento sobre o estado do Pará demonstrou de modo preponderante um padrão de CHI negativo com vento divergente em baixos níveis e CHI positivo com convergência de vento em camadas elevadas da troposfera, os quais se relacionam com o movimento subsidente do vento vertical sobre o estado do Pará. Essa característica inibe a formação de nebulosidade, o que pode ser confirmado pelas anomalias positivas de ROL, não apenas no Pará, mas em grande parte do norte/nordeste do Brasil. A combinação desses parâmetros resulta em SPI inferior a -1 desvio padrão na maior parte dos municípios paraenses em todos os trimestres, exceto em DJF em que foi verificado SPI negativo no oeste e nordeste/leste do estado.

Condições essencialmente opostas foram observadas nas composições de ExtCHU, ou seja, os padrões negativos de TSM indicaram a presença do modo La Niña no Pacífico e do modo gradiente de anomalias de TSM no Atlântico (frio na bacia norte e quente na bacia sul), propiciando a atuação da ZCIT sobre a Amazônia (anomalias negativas de ROL) e resultando na predominância de SPI acima de +1 desvio padrão para a maioria dos municípios do estado do Pará.

Quanto à precipitação nos municípios paraenses, a inter-relação entre os modos de variabilidade e os sistemas atmosféricos é direta, uma vez que os sistemas como a ZCIT e a ZCAS, são enfraquecidos ou intensificados em razão da manifestação do ENOS e/ou do gradiente meridional de anomalias de TSM.

Assim sendo, a dinâmica dos ExtSEC e ExtCHU nos municípios do Pará está diretamente relacionada aos padrões de TSM nos Oceanos Pacífico e Atlântico tropicais, que modulam a circulação troposférica e a convecção sobre o estado, o que está em conformidade com estudos como os de Alves e Repelli (1992), De Souza e Ambrizzi (2002) e De Souza et al. (2004), que abordaram a variabilidade pluviométrica no leste da Amazônia, e como o de Nobre e Melo (2001), que trataram da variabilidade climática intrasazonal sobre o Nordeste do Brasil.

Acerca do modo de variabilidade do Oceano Atlântico, os resultados encontrados no presente trabalho corroboram com a literatura, como os estudos que concluíram que os padrões de TSM no Atlântico e as anomalias de circulação atmosférica possuem relação com a variabilidade pluviométrica na América do Sul (NOBRE e SHUKLA, 1996). Assim como Silva Ferreira et al. (2015), foi detectado nesta pesquisa que a persistência da ZCIT é intensificada por um padrão de anomalias de TSM negativas no Atlântico Norte e positivas no Atlântico Sul. Inversamente, os eventos de dias sem chuva se relacionam ao enfraquecimento da ZCIT, associado a um gradiente de anomalias de TSM no Atlântico apontando para o Hemisfério Norte.

Em uma análise da circulação atmosférica das Células de Hadley e Walker, De Souza e Ambrizzi (2002) e De Souza et al. (2004) mostraram que as anomalias negativas de precipitação na Amazônia oriental associam-se a uma combinação entre a manifestação de El Niño no Oceano Pacífico e uma inibição da atividade convectiva da ZCIT. Uma comprovação desta afirmação foi o estudo de Marengo et al. (2008), que detectou o aquecimento anormal as águas do Atlântico tropical norte como o principal responsável pela intensificação da Célula de Hadley e a consequente seca histórica na Amazônia durante o ano de 2005. Por outro lado, as anomalias positivas de precipitação na Amazônia oriental relacionam-se com a ocorrência de La Niña no Oceano Pacífico e condições favoráveis de convecção no Oceano Atlântico para a intensificação da ZCIT.

Estudos que abordam índices climáticos, como Santos (2014) para a Amazônia ocidental e Silva (2010) para o estado do Pará, constataram que a variabilidade interanual dos índices de precipitação possui relações com os episódios ENOS e as fases do Dipolo do Atlântico. Particularmente em Silva (2010), que utilizou índices de precipitação relativos a sequência de dias chuvosos e ao número de dias com eventos extremos, as conclusões evidenciaram que os anos mais expressivos da quantidade de dias secos consecutivos são coincidentes com anos de episódios de El Niño e fase quente do gradiente de TSM do Atlântico, configurados de modo isolado e/ou

ISSN: 2237-8642 (Eletrônica)

simultâneo. O estudo também encontrou que algumas estações meteorológicas do Pará (Belterra, Breves, Marabá, Monte Alegre, Soure e Tucuruí) apresentam extremos de precipitação modulados pelos padrões climáticos em ambos os oceanos adjacentes. Contudo, dependendo da magnitude das anomalias de TSM em anos específicos, o Pacífico pode apresentar predomínio em relação ao Atlântico, ou o oposto.

4. CONCLUSÃO

Na comparação da distribuição espacial da frequência de extremos de precipitação nos municípios do estado do Pará, conclui-se que, em termos anuais, a ocorrência dos eventos chuvosos - ExtCHU é relativamente maior (8 a 12%) do que os eventos secos - ExtSEC (2 a 8%). Em termos sazonais, os ExtCHU se distribuem regularmente ao longo dos quatro trimestres do ano, indicando que os eventos de precipitação extrema podem se manifestar independente da estação do ano e do valor pluviométrico climatológico sazonal. Por outro lado, o período de ocorrência predominante de ExtSEC se configuram ao longo do Pará preferencialmente nos trimestres de DJF e MAM, sendo que em JJA se restringem ao setor nordeste e em SON predominam nos municípios situados no oeste/sul/sudeste do estado.

A ocorrência de ExtSEC nos municípios paraenses durante os trimestres mais chuvosos (DJF e MAM) pode gerar um desequilíbrio nas atividades econômicas, uma vez que JJA e SON apresentam totais de precipitação abaixo das normais climatológicas. Logo, um comprometimento do período chuvoso pode acarretar em estresse hídrico com potenciais prejuízos aos setores como a agricultura, mineração entre outras indústrias locais. Por outro lado, a frequência de ExtCHU distribuídos ao longo do ano, principalmente durante os trimestres de DJF e MAM, caracterizados como os mais chuvosos, é um indicativo de que uma maior quantidade de episódios de chuva extrema pode impactar diretamente a sociedade, principalmente nos municípios com condições inadequadas de infraestrutura de saneamento básico, serviços de saúde, transportes, entre outros.

A estrutura dinâmica tropical associada aos ExtSEC e ExtCHU nos municípios do estado do Pará evidenciou diferentes configurações dos modos climáticos nos Oceanos Pacífico e Atlântico tropical. Nas composições analisadas por trimestre foi detectado que a alta frequência de ExtSEC nos municípios paraenses associam-se primariamente ao modo climático El Niño no Pacífico, bem como a ocorrência do modo gradiente de anomalias de TSM apontando para o Hemisfério Norte no Oceano Atlântico (TSM anomalamente quente na bacia norte e fria na bacia sul), inibindo a atuação da ZCIT e explicando os extremos negativos de precipitação no Pará. Inversamente, a alta frequência de ExtCHU relaciona-se com a configuração de La Niña no Oceano Pacífico, bem como do modo gradiente de TSM apontando para o Sul no Oceano Atlântico (TSM anomalamente quente na bacia sul e fria na bacia norte), cujas configurações intensificam os eventos da ZCIT na região e originam os extremos chuvosos no Pará.

ISSN: 2237-8642 (Eletrônica)

REFERÊNCIAS

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVERK, G. Köppen's Climate Classification Map for Brazil. Meteorologische Zeitschrift, v.22, n.6, p.711–728, 2013.

ALVES, J. M. B.; REPELLI, C. A. A variabilidade pluviométrica no setor norte do nordeste e os eventos El Niño/Oscilação Sul. Revista Brasileira de Meteorologia, v.7, n. 2, p. 583–592, 1992.

BELAYNEH, A.; ADAMOWSKI, J. Standard Precipitation Index Drought Forecasting Using Neural Networks, Wavelet Neural Networks, and Support Vector Regression. Applied Neural Intelligence to Modeling, Control, and Management of Human Systems and Environments. v. 2012, p. 1-13, 2012.

BROWN, I. F.; SCHROEDER, W.; SETZER, A.; MALDONADO, M.; PANTOJA, N.; DUARTE, A.; MARENGO, J. A. Fires in rain forests of southwestern Amazonia: multi-national satellite imagery for monitoring and for informing the public. EOS Transactions, American Geophysical Union, v. 87, n. 26, p. 253–264, 2006.

CARDOSO, M. F.; HURTT, G.; MOORE, B.; NOBRE, C. A. Projecting Future Fire Activity in Amazonia. Global Change Biology, v. 9, p. 656-669, 2003.

CARVALHO, L. M. V.; JONES, C.; LIEBMANN, B. The South Atlantic Convergence Zone: intensity, form, persistence, and relationships with intraseasonal to interannual activity and extreme rainfall. Journal of Climate, v. 17, p. 88-108, 2004.

COELHO, C. A. S.; DRUMOND, A. R. M.; AMBRIZZI, T. Estudo climatológico sazonal da precipitação sobre o Brasil em episódios extremos da oscilação sul. Revista Brasileira de Meteorologia, v.14, n. 1, p. 49-65, 1999.

COELHO, C. A. S.; UVO, C.; AMBRIZZI, T. Exploring the impacts of the tropical Pacific SST on the precipitation patterns over South America during ENSO periods. Theoretical and Applied Climatology, v. 71, p. 185-197, 2002.

CHAVES, R. R.; NOBRE, P. Interactions between sea surface temperature over the South Atlantic Ocean and the South Atlantic Convergence Zone. Geophysical Research Letters, v. 31, 2004.

COHEN, J. C. P.; SILVA DIAS, M. A. F.; NOBRE, C. A. Environmental conditions associated with amazonian squall lines: a case study. Monthly Weather Review, v. 123, p. 3163-3174, 1995.

COUTINHO, E. C.; ROCHA, E. J. P.; LIMA; A. M. M.; RIBEIRO, H. M. C.; GUTIERREZ, L. A. C. L.; BARBOSA, A. J. S.; PAES, G. K. A. A.; BISPO, C. J. C.; TAVARES, P. A. Riscos socioeconômicos e ambientais em municípios banhados pelos afluentes do Rio Amazonas. Revista Ambiente & Água, Taubaté, v.12, n.5, p.814-828, 2017.

DE SOUZA, E. B.; ALVES, J. M. B.; NOBRE, P. Anomalias de precipitação nos setores norte e leste do Nordeste Brasileiro em associação aos eventos do Padrão de Dipolo sobre o Atlântico tropical. Revista Brasileira de Meteorologia (Impresso), Brasil, v. 13, n. 2, p. 45-56, 1998.

DE SOUZA, E. B.; AMBRIZZI, T. ENSO impacts on the South American rainfall during 1980s: Hadley and Walker circulation. Atmósfera (México), v. 15, p. 105-120, 2002.

DE SOUZA, E. B.; KAYANO, M. T.; AMBRIZZI, T. The regional precipitation over the eastern Amazon/Northeast Brazil modulated by tropical Pacific and Atlantic SST anomalies on a weekly timescale. Revista Brasileira de Meteorologia (Impresso), v. 19, n.3, p. 113-122, 2004.

SOUZA, E. B.; KAYANO, M. T.; AMBRIZZI, T. Intraseasonal and submonthly variability over the Eastern Amazon and Northeast Brazil during the autumn rainy season. Theoretical and Applied Climatology, v. 81, p. 177-191, 2005.

DE SOUZA, E.B.; KAYANO, M. T.; TOTA, J.; PEZZI, L. P.; FISCH, G.; NOBRE, C. On the influences of the El Niño, La Niña and Atlantic Dipole Pattern on the Amazonian Rainfall during 1960-1998. Acta Amazonica (online), Brasil, v. 30, n.2, p. 305-318, 2000.

ESTEVES, C. J. O. Risco e vulnerabilidade socioambiental: Aspectos Conceituais. Caderno Ipardes. Estudos e Pesquisas, Curitiba, PR, n. 2, p.62-79, 2011.

HASTENRATH, S. Variations in low-latitude circulation and extreme climatic events in the tropical Americas. Journal of Atmospheric Sciences, v. 33, n. 2, p. 202-215, 1976.

HASTENRATH, S. In search of zonal circulations in the equatorial Atlantic sector from the NCEP-NCAR reanalysis. International Journal of Climatology, v. 21, p. 37-47, 2001.

HUFFMAN, G. J.; BOLVIN, D. T. TRMM and other data precipitation data set documentation, Global Change Master Directory, NASA, p. 44, 2013.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA–IBGE. Perfil dos Municípios Brasileiros 2012, IBGE, 291p. 2013. Disponível em: http://www.ibge.gov.br/home/estatistica. Acesso em julho de 2019.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA-IBGE. IBGE Cidades. Perfil dos Municípios Brasileiros. Fonte: Brasil em Síntese. Disponível em: https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pa/panorama. Acesso em outubro de 2019.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE–IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley (eds.), Cambridge, United Kingdom and New York, 2013.

KALNAY, E. et al. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. Bulletin of the American Meteorological Society, v. 77, p. 437-471, 1996.

KAYANO, M. T.; RAO, V. B.; MOURA, A. D. Tropical circulations and the associated rainfall anomalies during two contrasting years. Journal of Climatology, v. 8, p. 477-488, 1988.

KOUSKY, V. E.; KAYANO, M. T.; CAVALCANTI, I. F. A. A review of the southern oscillation oceanic atmospheric circulation changes and related rainfall anomalies. Tellus, v. 36A, p. 490-504, 1984.

KUMMEROW, C.; SIMPSON, J.; THIELE, O.; BARNES, W.; CHANG, A. T. C.; STOCKER, E.; ADLER, R. F.; HOU, A.; KAKAR, R.; WENTZ, F.; ASHCROFT, P.; KOZU, T.; HONG, Y.; OKAMOTO, K.; IGUCHI, T.; KUROIWA, H.; IM, E.; HADDAD, Z.; HUFFMAN, G.; FERRIER, B.; OLSON, W. S.; ZIPSER, E.; SMITH, E.

A.; WILHEIDT, T. T.; NORTH, G.; KRISHNAMURTI, T.; NAKAMURA, K. The Status of the Tropical Rainfall Measuring Mission. Mission (TRMM) after Two Years in Orbit. Journal of Applied Meteorology, v. 39, n. 12, p. 1965-1982, 2000.

LEWIS, S. L.; BRANDO, P. M.; PHILLIPS, O. L.; VAN DER HEIJDEN, G. M. F.; NEPSTAD, D. The 2010 Amazon Drought. Science, v.331, pp. 554, 2011.

LIEBMANN, B.; MARENGO, J. Interannual variability of the rainy season and rainfall in the Brazilian Amazon Basin. Journal of Climate, v. 14, p. 4308-4318, 2001.

LIEBMANN B.; SMITH, C. A. Description of a Complete (Interpolated) Outgoing Longwave Radiation Dataset. Bulletin of the American Meteorological Society, v. 77, p. 1275-1277, 1996.

LOPES, M. N. G.; DE SOUZA, E. B.; FERREIRA, D. B. S. Climatologia regional da precipitação no estado do Pará. Revista Brasileira de Climatologia, v. 12, p. 84-102, 2013.

MARENGO J. A.; NOBRE, C.; TOMASELLA, J.; OYAMA, M.; SAMPAIO, G.; CAMARGO, H.; ALVES, L. M. The drought of Amazonia in 2005. Journal of Climate, v. 21, p. 495-516, 2008.MARENGO, J. A.; AMBRIZZI, T.; DA ROCHA, R. P.; ALVES, L. M.; CUADRA, S.0 V.; VALVERDE, M. C.; TORRES, R. R.; SANTOS, D. C.; FERRAZ, S. E. T. Future change of climate in South America in the late twenty-first century: intercomparison of scenarios from three regional climate models. Climate Dynamics, v.35, p. 1073-1097, 2009.

MARENGO, J. A.; BORMA, L. S.; RODRIGUEZ, D. A.; PINHO, P.; SOARES, W. R.; ALVES, L. M. Recent Extremes of Drought and Flooding in Amazonia: Vulnerabilities and Human Adaptation. American Journal of Climate Change, v. 2, p. 87-96, 2013.

MCKEE, T. B.; DOESKEN, N. J.; KLEIST, J. The relationship of drought frequency and duration to time scales. In: Proceed Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology. American Meteorological Society, p. 179-183, 1993.

MOLION, L. C. B. Climatologia Dinâmica da região Amazônica: mecanismos de precipitação. Revista Brasileira de Meteorologia. v. 2, n. 1, p. 107-117, 1987.

MORAES, B. C.; COSTA, J. M. N.; COSTA, A. C. L.; COSTA, M. H. Variação espacial e temporal da precipitação no estado do Pará. Acta Amazonica, v. 35, n. 2, p. 207–214, 2005.

NOBRE, P.; MELO, A. B. C. Variabilidade climática intrasazonal sobre o Nordeste do Brasil em 1998-2000. Climanálise (São José dos Campos), Brasil, v. 16, p. 1-10, 2001.

NOBRE, P.; SHUKLA, J. Variations of sea surface temperature, wind stress, and rainfall over the tropical Atlantic and South America. Journal of Climate, v. 9, n. 10, p. 2464–2479, 1996.

PHILIPPS, O. L. et al. Drought Sensitivity of the Amazon Rainforest. Science, v. 323, n. 5919, p. 1344-1347, 2009.

RAO, V. B.; HADA, K. Characteristics of Rainfall over Brazil: Annual Variations and Connections with the Southern Oscillation. Theoretical and Applied Climatology, v. 42, p. 81-91, 1990.

REYNOLDS, R. W.; SMITH, T. M.; LIU, C.; CHELTON, D. B.; CASEY, K. S.; SCHLAX, M. G. Daily high-resolution blended analyses for sea surface temperature. Journal Climate, v. 20, p. 5473-5496, 2007.

RONCHAIL J.; COCHONNEAU, G.; MOLINIER, M.; GUYOT, J. L.; CHAVES, A. G. M.; GUIMARÃES, V.; OLIVEIRA, E. Interannual Rainfall Variability in the Amazon Basin and Sea-Surface Temperatures in the Equatorial Pacific and the Tropical Atlantic Oceans. International Journal of Climatology, v. 22, n. 13, p. 1663-1686, 2002.

SANTOS, D. C. Análise Multivariada de Índices Climáticos na Amazônia Ocidental. Revista Brasileira de Climatologia, v. 15, p. 49-63, 2014.

SANTOS, F. A. A.; ROCHA, E. J. P. Alagamento e Inundação em Áreas Urbanas. Estudo de Caso: Cidade de Belém. Revista Geoamazônia, v. 2, p. 33-55, 2013.

SANTOS, S. R. Q.; BRAGA, C. C.; SANSIGOLO, C. A.; SANTOS, A. P. P. Determinação de regiões homogêneas do Índice de Precipitação Normalizada (SPI) na Amazônia Oriental. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 32, p.111-122, 2017.

SILVA, A. N. B. Índices de Extremos Climáticos e Tendências de Precipitação Anual e Sazonal na Amazônia Oriental. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais), Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais. Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Museu Paraense Emílio Goeldi e EMBRAPA, Belém, 2010.

SILVA FERREIRA, D. B. S.; DE SOUZA, E. B.; MORAES, B. C.; MEIRA FILHO, L. G. Spatial and temporal variability of rainfall in Eastern Amazon during the rainy season. The Scientific World Journal, v. 2015, p. 1-9, 2015.

SOUSA, A. M. L.; ROCHA, E. J. P.; VITORINO, M. I.; SOUZA, P. J. O. P.; BOTELHO, M. N. Variabilidade Espaço-Temporal da Precipitação na Amazônia Durante Eventos ENOS. Revista Brasileira de Geografia Física, v. 8, n. 1, p. 13-24, 2015.

TRENBERTH, K. E. The Definition of El Niño. Bulletin of the American Meteorological Society, v. 178, n. 12, p. 2771-2777, 1997.

ZENG, N.; YOON, J. H.; MARENGO, J. A.; SUBRAMANIAM, A.; NOBRE, C. A.; MARIOTTI, A.; NEELIN, D. Causes and impacts of the 2005 Amazon drought. Environment Research Letters. v.3, n.1, p.014002 (9p), 2008.