



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
EMBRAPA – AMAZÔNIA ORIENTAL
MUSEU PARAENSE EMÍLIO GOELDI
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS

MARCOS RONIELLY DA SILVA SANTOS

O CLIMA E A VULNERABILIDADE SOCIOAMBIENTAL: INTERAÇÕES NA
REGIÃO COSTEIRA DA AMAZÔNIA

BELÉM – PARÁ

2021

MARCOS RONIELLY DA SILVA SANTOS

O CLIMA E A VULNERABILIDADE SOCIOAMBIENTAL: INTERAÇÕES NA
REGIÃO COSTEIRA DA AMAZÔNIA

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais do Instituto de Geociências, da Universidade Federal do Pará em parceria com a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Amazônia Oriental e Museu Paraense Emílio Goeldi, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Ciências Ambientais.

Área de concentração: Clima e dinâmica socioambiental na Amazônia

Linha de pesquisa: Interação clima, sociedade e ambiente

Orientadora: Profa. Dra. Maria Isabel Vitorino

Coorientadora: Profa. Dra. Luci Cajueiro Carneiro Pereira

BELÉM – PARÁ

2021

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará**

Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo (a) autor (a)

- S237c Santos, Marcos Ronielly da Silva.
O clima e a vulnerabilidade socioambiental: interações na região costeira da Amazônia / Marcos Ronielly da Silva Santos. — 2021.
133 f. : il. color.
- Orientador (a): Prof^a. Dra. Maria Isabel Vitorino
Coorientação: Prof^a. Dra. Luci Cajueiro Carneiro Pereira
Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Belém, 2021.
1. Mudança climática. 2. Precipitação. 3. Socioambiente.
4. Municípios costeiros. 5. Pará. I. Título.

CDD 551.609811

MARCOS RONIELLY DA SILVA SANTOS

O CLIMA E A VULNERABILIDADE SOCIOAMBIENTAL: INTERAÇÕES NA
REGIÃO COSTEIRA DA AMAZÔNIA

Tese aprovada pelo Programa de Pós-Graduação
em Ciências Ambientais do Instituto de
Geociências, da Universidade Federal do Pará
em parceria com a Empresa Brasileira de
Pesquisa Agropecuária – Amazônia Oriental e
Museu Paraense Emílio Goeldi

Área de concentração: Clima e dinâmica
socioambiental na Amazônia

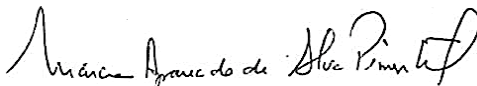
Linha de pesquisa: Interação clima, sociedade e
ambiente

Belém, 05 de março de 2021

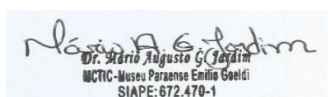
Banca examinadora:



Profa. Maria Isabel Vitorino – Orientadora
Doutora em Meteorologia
Universidade Federal do Pará



Profa. Marcia Aparecida da Silva Pimentel – Membro interno
Doutora em Geografia
Universidade Federal do Pará



Dr. Mário Augusto Gonçalves Jardim
MCTIC - Museu Paraense Emílio Goeldi
SIAPE: 672.470-1

Prof. Mário Augusto Gonçalves Jardim – Membro interno
Doutor em Ciências Biológicas
Museu Paraense Emílio Goeldi



Prof. Marcelo Rollnic – Membro externo
Doutor em Oceanografia
Universidade Federal do Pará



Prof. Octavio Cesar Mosso Aranda – Membro externo
Doutor em Ciências do Mar
Universidade Politécnica da Catalunya (Espanha)

Aos meus Avós paternos Pedro dos Santos e Sebastiana Alzira, e maternos Manoel
Honorato e Ofélia Rosa
(In memoriam)

Residentes da zona costeira, que com coragem, dedicação e trabalho árduo,
possibilitaram o sustento e a criação de seus filhos a partir dos frutos das terras e mares
bragantinos.

AGRADECIMENTOS

Deus, Senhor da vida, que mantém a complexidade do universo e a ordem do caos.

Aos meus progenitores, Benedito Sousa dos Santos e Maria Madalena da Silva Santos pelo incentivo e apoio durante minha jornada acadêmica.

À minha irmã, Milena de Nazaré dos Santos Quaresma e ao meu cunhado José Augusto de Sena Quaresma pelo auxílio em todos os momentos.

A Dr^a Maria Isabel Vitorino pela orientação, que tem me direcionado a desenvolver a pesquisa, e a superar os obstáculos oriundos da carreira científica, contribuindo para minha formação pessoal e profissional.

A professora Dr^a Luci Cajueiro pela coorientação e auxílio na pesquisa, principalmente pela obtenção dos dados oceanográficos.

A Dr^a Ana Flávia Quintão, pelo ensinamento na metodologia de Vulnerabilidade Socioambiental.

Aos meus tios Jorge e Augusta Melo, e José e Ana Celina, pelo acolhimento domiciliar durante meu processo na cidade de Belém do Pará.

Aos colegas do Laboratório de Oceanografia Costeira e Estuarina (LOCE) UFPA/Campus Bragança – em especial a Natália Nascimento e Antônio Rafael de Oliveira por todos os esclarecimentos no sobre os dados hidrológicos e estatísticos

Ao meteorologista e amigo da Universidade Federal do Pará – Giordani Rafael pelas considerações da tese.

A secretaria de saúde do Estado do Pará, pela disponibilidade dos dados epidemiológicos;

Aos professores do programa interinstitucional de Pós-Graduação em Ciências Ambientais (PPGCA), de modo particular a Dra Aline Meiguins e Marcia Aparecida da Silva Pimentel pelas recomendações metodológicas e conhecimentos fornecidos durante as disciplinas.

A Universidade Federal do Pará, Museu Paraense Emílio Goeldi e Embrapa, que possibilitaram a obtenção do título de doutorado, bem como o fornecimento de todo o subsídio necessário para a concretização deste projeto.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudo.

Aos membros da banca examinadora pela disponibilidade e gentileza em aceitar meu convite, corroborando com as contribuições içadas ao aperfeiçoamento desta pesquisa.

RESUMO

As regiões costeiras são as áreas mais afetadas pelas mudanças climáticas, e, portanto, as mais vulneráveis, levando em consideração a intensidade de extremos climáticos e a grande concentração humana. Neste contexto, este trabalho de Tese de Doutorado apresenta uma análise das possíveis interações das mudanças do clima, associadas aos processos socioambientais, com vistas a vulnerabilidade na zona costeira do estado do Pará. Especificamente buscou-se: i) investigar a variabilidade espaço-temporal da precipitação na região costeira da Amazônia Oriental; ii) analisar a distribuição de variáveis físicas e hidrológicas, durante períodos típicos e atípicos de clima e iii) mapear a vulnerabilidade socioambiental dos municípios costeiros frente às mudanças climáticas. Visto que as mudanças do clima potencializam a vulnerabilidade socioambiental na região costeira da Amazônia. Para tanto empregou-se metodologias padronizadas e adequadas a cada tema tratado, com ênfase na utilização de dados de precipitação por sensoriamento remoto da técnica - CMORPH, aplicação de análise estatística por meio da Análise de Componentes Principais, Coleta de campo por meio de CTD para análise das variáveis hidrológicas e, identificação da vulnerabilidade socioambiental pelo método Índice de Vulnerabilidade Municipal (IVM). Os principais resultados encontrados foram: i) O CMORPH evidenciou a existência de um gradiente de precipitação nos dois principais modos pluviométricos, que explicam 88% da variância dos dados. O primeiro modo demonstra os sistemas de grande escala com distribuição do período chuvoso e menos chuvoso. O segundo modo está associado a ocorrência de sistemas de mesoescala. ii) as chuvas e as marés modulam as variáveis hidrológicas locais, apresentando maior variabilidade em ano Seco e El Niño com maior interação em estuários abertos, constatou-se relação negativa da precipitação com a salinidade e positiva com a turbidez e clorofila-a, e iii) os municípios mais vulneráveis estão na região da Ilha do Marajó – oeste da área de estudo, onde o IVM varia entre 1 (Afuá) e 0,55 (Soure) para os cenários 4.5 e 8.5, respectivamente. Os subíndices de Sensibilidade (ISe) e Sociodemográfico (ISd) apontaram a maior influência na vulnerabilidade atual dos municípios. Tais resultados fornecem subsídios científicos para a tomada de decisão em nível municipal, podendo ser replicados para outras regiões, visando a adaptação das sociedades às mudanças climáticas.

Palavras-chave: Mudança climática. Precipitação. Risco. Socioambiente. Municípios costeiros. Pará.

ABSTRACT

Coastal regions are the areas most affected by climate change, and therefore the most vulnerable, taking into account the intensity of climatic extremes and the great human concentration. In this context, this Doctoral Thesis work presents an analysis of the possible interactions of climate changes, associated with socioenvironmental processes, with a view to vulnerability in the coastal zone of the state of Pará. Specifically, we sought to: i) obtain the space-time variability precipitation in the coastal region of the Eastern Amazon; ii) know the distribution of physical and hydrological variables, during typical and atypical periods of climate and iii) examine the socio-environmental vulnerability of coastal municipalities in the face of climate change. Since climate change increases social and environmental vulnerability in the coastal region of the Amazon. For this purpose, standardized methodologies were used, adapted to each theme treated, with emphasis on the use of precipitation data by remote sensing of the technique - CMORPH, application of statistical analysis through Principal Component Analysis, Field collection through CTD for analysis of hydrological variables and identification of socio-environmental vulnerability using the Municipal Vulnerability Index (IVM) method. The main results found were: i) CMORPH evidenced the existence of a precipitation gradient in the two main rainfall modes, which explain 88% of the data variance. The first mode shows large-scale systems with rainy and less rainy periods. The second mode is associated with the occurrence of mesoscale systems. ii) rainfall and tides modulate local hydrological variables, showing greater variability in years of Dry and El Niño with greater complexity in open estuaries, a negative relationship between precipitation and salinity and a positive relationship with turbidity and chlorophyll was found, and iii) the most vulnerable municipalities are in the Marajó Island region - west of the study area, where the IVM varies between 1 (Afuá) and 0.55 (Soure) for scenarios 4.5 and 8.5, respectively. The Sensitivity (ISe) and Sociodemographic (ISd) sub-indices showed the greatest influence on the current vulnerability of the municipalities. These results provide scientific subsidies for decision making at the municipal level, and can be replicated for other regions, aiming at the adaptation of societies to climate change.

Keywords: Climate change. Precipitation. Risk. Socioenvironment. Coastal municipalities. Pará.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Regiões homogêneas de precipitação na Amazônia Oriental.....	15
Figura 2- Zona Costeira Estuarina Paraense (ZCEP) do estado do Pará.....	19
Figura 3- Mapa do índice de vulnerabilidade total.....	23
Figura 4- Estrutura que sintetiza o arcabouço metodológico da tese.....	28
Figura 5- Região costeira do estado do Pará, destacando elevação digital, área coberta e os três setores (setor 1 - insular, setor 2 - continental e estuarino e setor 3 – Atlântico).....	33
Figura 6- Grade regular do CMORPH.....	35
Figura 7- Precipitação média anual registrada na área de estudo entre 1998 e 2016, mostrando os anos selecionados como atípicos para os fins do presente estudo (EN = El Niño; NL = La Niña; D = Seca; T = Típica).....	36
Figura 8: Climatologia mensal da precipitação na zona costeira da Amazônia, para o período de 1998 a 2016.....	38
Figura 9- Climatologia sazonal da precipitação na zona costeira da Amazônia. (A) início das chuvas, (B) meses mais chuvosos, (C) meses de transição e início do período menos seco e (D) meses mais secos.....	39
Figura 10- Distribuição espaço-temporal da precipitação em anos atípicos (A) El Niño/1998, (B) El Niño/2015, (C) La Niña/2000, (D) La Niña/2009, (E) Seca/2005, (F) Seca/2012, (G), Neutro/2002 e (H) Neutro/2014.....	40
Figura 11- (A) Modo espacial da CP1 com 83%; (B) Modo espacial da CP2 com 5%; (C) Variabilidade média temporal da primeira componente principal e (D) Variabilidade média temporal da segunda componente principal.....	41
Figura 12- (A) Distribuição mensal da precipitação com maior correlação do padrão verificada pelo CMORPH – abril/2010; (B) Distribuição mensal da precipitação com menor correlação do padrão verificada pelo CMORPH – novembro/2008; (C) variabilidade temporal da primeira CP.....	42
Figura 13- (A) Distribuição mensal da precipitação com maior correlação do padrão verificada pelo CMORPH – dezembro/2005; (B) Distribuição mensal da precipitação com menor correlação do padrão verificada pelo CMORPH – fevereiro/2003; (C) variabilidade temporal da segunda CP.....	43
Figura 14- Área de estudo: localização dos estuários do Taperaçu e Rio Caeté e da Praia de Ajuruteua no nordeste paraense, com ênfase na posição das estações de coleta, grad do CMORPH e estação meteorológica.....	60
Quadro 1- Condições de coletas em campo.....	61

Figura 15- A. Precipitação total anual entre 1998 2017 da estação meteorológica, destacando os anos de Seco (D), típico (T), El Niño (EN) e La Niña (LN). B. Precipitação total anual entre 1998 e 2017 do CMORPH, destacando os anos Seco (D), típico (T), El Niño (EN) e La Niña (LN). C Climatologia do período 1998 a 2017 dos dados da estação meteorológica e D. Climatologia do período 1998 a 2017 dos dados do CMORPH...	64
Figura 16- A. Acumulado mensal de precipitação dados do CMORPH; B. Dados mensais médios e desvio padrão da salinidade e maré; C. Dados mensais médios e desvio padrão da clorofila-a e turbidez e D. Análise de componentes principais.....	65
Figura 17- A. Acumulado mensal de precipitação dados do CMORPH; B. Dados mensais médios e desvio padrão da salinidade e maré; C. Dados mensais médios e desvio padrão da clorofila-a e turbidez e D. Análise de componentes principais.....	67
Figura 18- A. Acumulado mensal de precipitação dados do CMORPH; B. Dados mensais médios e desvio padrão da salinidade e maré; C. Dados mensais médios e desvio padrão da clorofila-a e turbidez e D. Análise de componentes principais.....	70
Figura 19- (A) Mapa de localização da área de estudo na América do Sul. (B) Área de estudo com dados do Índice de Desenvolvimento Humano (IDH). (C) Área de estudo com Índice de Cobertura de Vegetação (NDVI) 1998 a 2018.....	83
Figura 20- Modelo conceitual adotado para o presente estudo.....	85
Quadro 2- Variáveis utilizadas.....	90
Figura 21- Mapa dos: (A) Índice de Exposição, (B) Índice de Sensibilidade, (C) Índice de Capacidade Adaptativa, (D) Índice de Vulnerabilidade Geral.....	91
Figura 22- Mapa do: (A) Pesos da Extensão Costeira, (B) Peso da Distância da Costa para o Centro Urbano, (C) Índice de Exposição Costeira.....	92
Figura 23- (A) Índice Climático 4.5, (B) Índice Climático 8.5 (C) Índice de Vulnerabilidade Municipal 4.5, (D) Índice de Vulnerabilidade Municipal 8.5.....	93

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO GERAL	12
1.1 Referencial Teórico	13
1.1.1 Mecanismos e sistemas precipitantes.....	13
1.1.2 Vulnerabilidade Socioambiental.....	21
1.1.3 Zona costeira: características naturais e antrópicas.....	16
1.2 Justificativa e interdisciplinaridade da pesquisa	25
1.3 Objetivos e hipóteses	25
1.4 Estrutura da tese	27
CAPÍTULO 2 VARIABILIDADE ESPAÇO TEMPORAL DA PRECIPITAÇÃO NA ZONA COSTEIRA DA AMAZÔNIA	29
2.1 Introdução	31
2.2 Material e métodos	33
2.2.1 Área de estudo.....	33
2.2.2 Dados.....	34
2.2.3 Metodologia.....	35
2.3 Resultados	37
2.3.1 Análise mensal.....	37
2.3.2 Análise sazonal.....	38
2.3.3 Análise anual.....	39
2.3.4 Modos da precipitação.....	40
2.4 Discussão	43
2.5 Conclusão	46
CAPÍTULO 3 DISTRIBUIÇÃO ESPAÇO TEMPORAL DAS VARIÁVEIS FÍSICAS E HIDROLÓGICAS NA REGIÃO COSTEIRA DA AMAZÔNIA DURANTE EXTREMOS DE CLIMA	53
3.1 Introdução	55
3.2 Material e métodos	57
3.2.1 Caracterização da área de estudo.....	57
3.2.2 Metodologia.....	60
3.2.2.1 <i>Trabalho de Campo</i>	60
3.2.2.2 <i>Variáveis hidrológicas</i>	60

3.2.2.3 <i>Trabalhos de Laboratório</i>	60
3.2.2.4 <i>Variável física</i>	62
3.2.2.5 <i>Variáveis hidrológicas</i>	62
3.2.2.6 <i>Análise estatística</i>	63
3.3 Resultados	63
3.3.1 Precipitação de superfície e sensoriamento remoto.....	63
3.3.1 Distribuição espaço temporal em anos típicos e atípicos de clima.....	64
3.4 Discussão	68
3.5 Conclusão	71
CAPÍTULO 4 VULNERABILIDADE SOCIOAMBIENTAL ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS DOS MUNICÍPIOS COSTEIROS NO ESTADO DO PARÁ	79
4.1 Introdução	80
4.2 Material e métodos	83
4.2.1 Caracterização da área de estudo.....	83
4.2.2 Modelo conceitual do Índice de Vulnerabilidade Municipal – IVM.....	84
4.2.3 Índices e subíndices.....	86
4.2.4 Cálculo e padronização.....	88
4.2.5 Espacialização dos dados.....	89
4.3 Resultados	89
4.3.1 Índice de Vulnerabilidade Geral – IVG e o Subíndice de Exposição Costeira (IEC).....	90
4.3.2 Índice Climático – IC e o Índice de Vulnerabilidade Municipal – IVM.....	92
4.4 Discussão	94
4.5 Conclusões	98
5 CONCLUSÃO GERAL	105
5.1 Principais resultados – Síntese	105
5.2 Impactos e implicações	106
5.3 Lacunas e perspectiva futura	107
REFERÊNCIAS	108
APÊNDICE A	114

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO GERAL

As variações e mudanças do clima sempre interferiram nas formas de organização social e nas diversas estruturas ambientais. Mais recentemente, este tema tem sido discutido por pesquisadores que buscam compreender como as mudanças climáticas podem influenciar as sociedades locais e as estruturas físicas, químicas e biológicas do meio ambiente. Em corroboração científica esta tese emerge da seguinte questão: De que forma o clima interfere nas condições de vulnerabilidade social e ambiental em uma região costeira na Amazônia oriental? Para tentar responder essa complexa indagação parte-se do princípio que as mudanças climáticas, verificadas pela variabilidade de precipitação, afetam negativamente as sociedades e ambientes locais com maior exposição da vulnerabilidade.

O relatório de clima do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) revela, para cada região brasileira, as potenciais consequências das mudanças climáticas até o final do século XXI. Tais estudos mostram que a região norte do país deverá sofrer com as maiores consequências dessas mudanças, a partir do aumento da temperatura. Estes resultados chamam a atenção para novas situações de vulnerabilidade, ou agravamento de situações já existentes, visto o surgimento de um novo perfil sociodemográfico e epidemiológico da população local e dos novos padrões de redistribuição populacional e de atividades econômicas. Neste cenário é importante discutir como as mudanças climáticas podem interferir na vulnerabilidade social e ambiental, indicando possíveis “caminhos” para adaptação às mudanças ambientais e minimizando as situações existentes de vulnerabilidade.

O objetivo desta tese foi compreender as possíveis interações do clima e a vulnerabilidade a partir dos elementos sociais e ambientais na região costeira da Amazônia. Em particular, a pesquisa discute um estudo de caso para a região costeira do estado do Pará com potenciais cenários de como os aumentos de temperatura e precipitação podem interferir na vulnerabilidade socioambiental e, conseqüentemente, podem atuar como importante mecanismo ordenador da distribuição das chuvas e das variáveis hidrológicas e na redefinição espacial da vulnerabilidade.

Para atender o objetivo proposto, a tese foi organizada em capítulos. Inicialmente apresenta-se os elementos teóricos que fundamentaram a pesquisa, propondo ao leitor a necessidade de estudo sobre o tema, para isto foram divididos em três tópicos: I)

principais mecanismos e sistemas que atuam na região costeira do Pará; II) caracterização da vulnerabilidade socioambiental, com ênfase nos conceitos e pesquisas sobre vulnerabilidade local; e III) descrição da zona costeira, com foco nas particularidades naturais e sociais da região paraense. Esse referencial teórico indica a necessidade e importância de compreender a relação da vulnerabilidade e as mudanças do clima. Em seguida, são apresentados três capítulos que seguem os objetivos específicos da tese, buscando responder ao problema da pesquisa e retificando as hipóteses estudadas. O último capítulo da tese faz uma síntese dos principais resultados encontrados, com uma discussão sobre futuras adaptações metodológicas e a necessidade de novos estudos sobre o tema, com vista a apropriação dos estudos para políticas públicas em suas diversas esferas, como estratégia de adaptação aos impactos das mudanças climáticas.

Outras hipóteses testadas e apresentadas nos capítulos seguintes são: 1 – Há uma modificação na variabilidade espacial da precipitação em anos de extremos climáticos, ratificado pelos dados de sensoriamento remoto. 2 – As variáveis físicas modulam a hidrologia local, com maior interferência durante anos com ocorrência de extremos negativos de chuva e 3 – Os cenários climáticos interferem na vulnerabilidade socioambiental dos municípios costeiros do Pará, elevando sua vulnerabilidade de forma heterogênea no espaço. O capítulo 1 sintetiza os principais temas abordados na pesquisa, conduzindo um conhecimento inicial sobre as condições climáticas, ambientais e sociais da região em questão, a fim de alcançar o objetivo geral desta tese. A posteriori apresenta-se a estrutura, a interdisciplinaridade e as hipóteses que nortearam os capítulos e os objetivos da pesquisa.

1.1 Referencial Teórico

1.1.1 Mecanismos e sistemas precipitantes

O clima é a sucessão de diferentes estados do tempo que se repetem e se sucedem na atmosfera ao longo do ano em uma determinada região, em outras palavras, o clima passa a ser a integral do tempo, mensurado em um período mínimo de 30 anos (WMO, 2007). Para aferir o clima de um lugar, é necessário fazer observações do tempo atmosférico medido a partir da regularidade nas variáveis meteorológicas. Essas variáveis que compõem o clima são a temperatura, a pressão atmosférica, a precipitação, o vento. Na região Amazônica, a precipitação é a variável climática mais investigada, pois induz

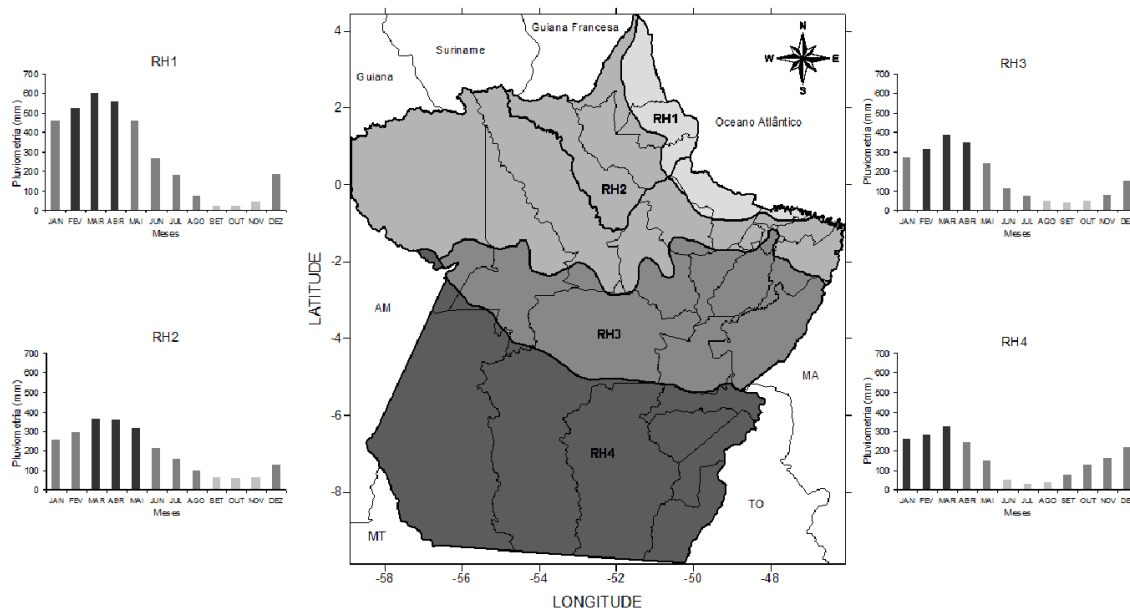
outras variáveis meteorológicas, apresentando um amplo espectro de variação no espaço e no tempo (ALBUQUERQUE et al., 2010; SOUZA et al., 2009).

A variação espacial e temporal da precipitação na região amazônica é resultado da interação dos mecanismos oceano atmosfera e sistemas meteorológicos em diferentes escalas (MARENGO, 2006; MOLION, 1987). Alguns dos mecanismos e sistemas que interferem na promoção e distribuição de chuva na região são: Oscilação do Atlântico Norte (OAN), Oscilação Decadal do Pacífico (ODP), El Niño Oscilação Sul (ENOS), Modo Meridional do Atlântico Norte (MMA), Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), Linhas de Instabilidades (LI's) e aglomerados convectivos de mesoescala (SODRÉ et al., 2015; SOUZA et al., 2009; COHEN; SILVA DIAS; NOBRE, 1995).

Estudos de Moraes et al. (2005) contribuem para a caracterização do regime de chuva no estado do Pará, mostrando que o acumulado anual de precipitação no litoral amazônico pode variar entre 2.300 a 3.300mm, tornando a região com maior quantitativo de chuva do estado durante o ano. Quando analisado o início da estação chuvosa e menos chuvosa no litoral paraense, são evidenciadas duas áreas com períodos distintos, a região do Marajó e do Nordeste paraense, a primeira tem o início da estação chuvosa em dezembro e menos chuvosa em julho, a segunda em janeiro e agosto, respectivamente.

Amanajás e Braga (2012) encontraram alguns padrões e regiões homogêneas para precipitação na Amazônia Oriental utilizando análise de componentes principais e métodos estatísticos hierárquicos. De acordo com seus estudos há formação de três grandes padrões de chuva na região, o período chuvoso de janeiro a abril, o período de transição de maio a agosto e período menos chuvoso de setembro a dezembro. Quando verificadas as regiões homogêneas, a região costeira do Pará apresenta duas categorias, a primeira região (RH1) que compreende em maior porção os municípios do Marajó com máximos e mínimos de acumulados mensais de 600 mm em março e 20 mm em setembro. A segunda região (RH2) compreende em maior parte os municípios do nordeste Paraense apresenta máximos de 400mm em abril e mínimos de 50 mm em outubro (Figura 1).

Figura 1- Regiões homogêneas de precipitação na Amazônia Oriental.



Fonte: Amanajás e Braga (2012).

Estudos observacionais de Germano et al. (2017) verificaram a distribuição diurna das chuvas na região costeira do Estado do Pará, relacionado a ocorrência de brisa. A pesquisa foi fundamentada com dados de sensoriamento em escala refinada de tempo e espaço (CMORPH). Os resultados elucidaram que os maiores valores de precipitação na costa acontecem no período de 15 e 18 horas e são induzidos principalmente pela ocorrência da brisa marinha, majoritariamente durante os meses de dezembro, janeiro e fevereiro. A precipitação sobre o oceano ocorre principalmente no tempo entre as 09 e 12 horas, influenciada pela ocorrência da brisa terrestre, que tem seus máximos nos meses de março, abril e maio.

Para Santos et al. (2016), os padrões de chuva em alguns municípios costeiros do nordeste paraense mostram dois modos, o primeiro padrão de distribuição está concentrado no período chuvoso nos meses de dezembro a maio, posteriormente no período menos chuvoso de junho a novembro. A distribuição espacial do primeiro padrão pode representar até 78% dos dados de chuvas, evidenciando que as maiores correlações se encontram no setor leste da região. Esta distribuição elucidada a atuação da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), sistema de grande escala que atua nos trópicos, sendo a principal responsável pelas chuvas que ocorrem na região Amazônica, principalmente no período chuvoso (MOLION, 1993).

A interação dos mecanismos oceano-atmosfera interferem na distribuição de chuva na região amazônica, possibilitando a ocorrência de eventos extremos que ocorrem de

formas heterogêneas no espaço (REIBOTA; SANTOS, 2015). Os extremos de chuva contribuem para a vulnerabilidade climática e eleva o índice de vulnerabilidade socioambiental dos municípios da região metropolitana de Belém, estado do Pará (SANTOS; VITORINO; PIMENTEL, 2017).

1.1.2 Zona costeira: características naturais e antrópicas

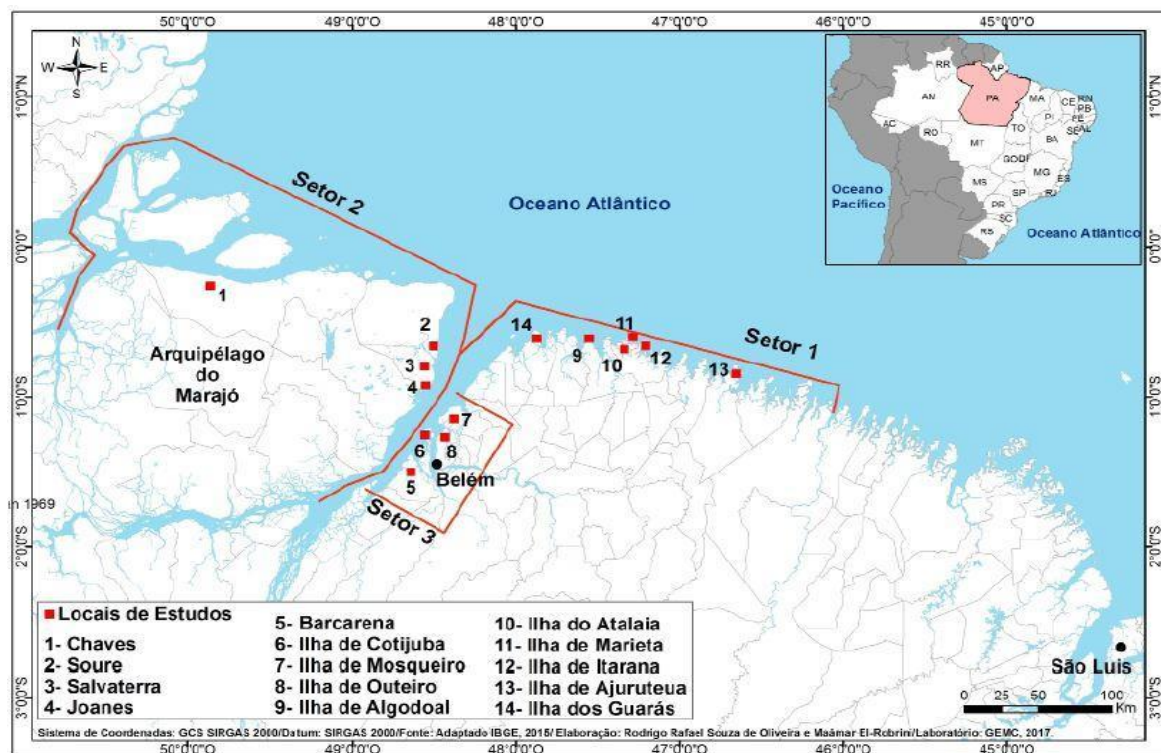
O Brasil apresenta a maior zona costeira da América Latina, caracterizada pelo elevado número de espécies animais e vegetais, com intensa atividade humana, fatores que influenciam diretamente na vulnerabilidade antrópica e natural dos ecossistemas locais. Sua localização biogeográfica neotropical favorece a zona da costa brasileira que abrange uma gama de ecossistemas e ambientes: praias, manguezais, restingas, lagoas, estuários e floresta tropical de encosta, destacando-se que em todos estes ecossistemas materializa-se a presença da espécie humana (CIMA, 1991).

A linha de costa brasileira abrange uma extensão de aproximadamente 8.500 km de extensão, levando em consideração todas as reentrâncias, baías e golfos, estendendo-se do rio Oiapoque (4°52'N) ao Arroio Chuí (33°45'S), e articulando-se com as áreas extracontinentais pelo Oceano Atlântico (PEREIRA et al., 2009). A região costeira conecta-se também ao interior do país por meio das bacias dos rios Parnaíba, Araguaia-Tocantins e Amazonas. (SCHERER; SANCHES; NEGREIROS, 2010). Neste cenário, a região costeira abriga um complexo mosaico de ecossistemas de alta relevância ambiental, cuja diversidade é marcada pela transição de ambientes terrestres e marinhos, com interações sociais que lhe conferem um caráter de fragilidade e que requerem, por isso, atenção especial do poder público (BRASIL, 1988).

De acordo com o BRASIL (2010), aproximadamente 27% da população brasileira reside nos municípios da zona costeira, o equivalente a 50,7 milhões de habitantes. Parte dessa população se ocupa com atividades, que estão relacionadas direta ou indiretamente, com o uso dos recursos naturais da região, como: ao turismo, produção de petróleo e gás natural, pesca e serviços. O IBGE (2020) mostra que durante os anos de 1991-2020 houve um incremento populacional nos municípios costeiros, o que implica em maiores dinâmicas sociais na região, como: a circulação de pessoas e apropriação de bens e serviços. Apesar do aumento populacional e urbano na zona costeira do Brasil, a distribuição geográfica da população nesta faixa territorial ainda é bastante irregular, com forte densidade demográfica nas proximidades das capitais.

A zona costeira da Amazônia brasileira abrange uma linha de costa situada entre o rio Oiapoque no estado do Amapá e a baía de São Marcos no estado do Maranhão, esta extensão ocupa cerca de 35% da linha costeira do Brasil e abrange diversos ambientes: praias, planícies de marés, pântanos salinos e doces, estuários, manguezais (PEREIRA et al., 2009). O ecossistema de manguezal é característico na zona costeira do estado do Pará. De acordo com a definição de El-Robrini et al. (2018), a costa paraense é denominada de Zona Costeira Estuarina Paraense (ZCEP) e é classificada em 3 setores: (1) Costa Atlântica do Salgado Paraense; (2) Insular Estuarino e (3) Continental Estuarino (Figura 2).

Figura 2- Zona Costeira Estuarina Paraense (ZCEP) do estado do Pará.



Fonte: El-Robrini et al. (2018).

Neste cenário algumas particularidades naturais da zona costeira da Amazônia são: i) grande extensão contínua de ecossistema de manguezal, uma das maiores do mundo, que proporciona ao ambiente uma alta produtividade biológica (LACERDA; SCHAEFFER-NOVELLI, 1992); ii) presença de uma ampla rede de drenagem de rios e estuários, como a bacia hidrográfica do rio Amazonas que aporta sedimentos e nutrientes ao longo da costa (GEYER et al., 1996); e iii) regimes de macromarés (PEREIRA et al., 2009). O ecossistema de manguezal é predominante na região costeira da Amazônia, apresentando características peculiares: como a associação da dinâmica de marés, o qual

lhe atribui a nomenclatura de costa de manguezais de macromaré da Amazônia – (SOUZA-FILHO, 2005).

A ZCEP enquadra-se na costa do tipo Amero Edge Trailing, apresentando-se como um litoral de “falsas rias”, com rios afogados, bastante ativos. A plataforma continental interna adjacente é recoberta por campos de depósitos arenosos orientados no sentido das correntes de maré (NE-SW) (El-ROBRINI et al., 2018). No setor 1 – A costa atlântica do salgado paraense, tem uma extensão de 500 km (linha reta, entre a foz do rio Pará e Gurupi) sendo profundamente recortado por reentrâncias. Nesse setor, são apontados alguns efeitos antrópicos como: crescimento desordenado e especulação imobiliária, aterramento de manguezais, pesca e agricultura predatória e exploração indiscriminada de minerais, com população estimada em 757,021 (IBGE, 2014). As correntes de maré são fortes, com velocidades que podem variar de $0,1\text{m s}^{-1}$ a $1,65\text{m s}^{-1}$ e as alturas de ondas (H_s) são de moderada energia durante a preamar, alcançando valores entre 1,5-1,7m. As praias marinhas apresentam larguras de estirâncio que podem variar durante a maré-baixa, de poucas centenas de metros até mais de 1km, sendo a maioria destas do tipo dissipativas (El-ROBRINI et al., 2018).

No setor 2 - insular estuarino, encontra-se uma população estimada em 56.155 habitantes, com densidade demográfica de 2,62 hab./km² (IBGE, 2014). As marés são semidiurnas com altura de mesomaré com 3,80m. As correntes de maré são fortes, com velocidade normalmente entre $0,3\text{m s}^{-1}$ e $1,7\text{m s}^{-1}$ (El-ROBRINI et al., 2018). No setor 3 - continental estuarino do rio Pará, localiza-se a capital do estado do Pará e sua região metropolitana, conferindo a esta área uma população de 1.813.764 habitantes com densidade demográfica próxima de 114,42 hab./km² (IBGE, 2014). As marés também são semidiurnas com amplitude de mesomaré com 3,30m, as correntes de maré são fortes com velocidade entre $0,6\text{m s}^{-1}$ e $1,7\text{m s}^{-1}$. Nesses dois últimos setores, também são registrados os mesmos efeitos antrópicos citados no setor 1, alguns em maior intensidade. A dinâmica da ZCEP se traduz sob a forma tanto de recuo/erosão, principalmente nos setores 2 e 3 estuarinos, como de progradação, moderadamente no setor 1 (El-ROBRINI et al., 2018).

Grande porção da ZCEP está enquadrada no domínio das terras baixas equatoriais da Amazônia e as planícies costeiras apresentam amplitude topográfica entre 2-20m e declividade 0° - 5° (El-ROBRINI et al., 2018). O relevo da região (exceto o da Ilha do Marajó) é sustentado por quatro unidades geomorfológicas distintas: 1 - O maciço residual que representa as maiores elevações de 200m; 2- A zona dos Platôs, que

constituem uma série de platôs de bordas escarpadas e ravinadas, esculpidas em sedimentos do Grupo Barreiras; 3- o Planalto Rebaixado da Amazônia da Zona Bragantina e o 4 - Baixo Planalto Costeiro, sustentado por conglomerados do Grupo Barreiras e caracterizado por um relevo colinoso de baixa amplitude (BARBOSA; PINTO, 1973; COSTA et al., 1977).

A planície costeira baixa é formada por uma planície lamosa predominantemente coberta por manguezais, a planície arenosa com formação de praias, dunas e paleodunas, e planície estuarina com dezenas de estuários, canais de maré, barras em pontal. Os principais processos físicos que ocorrem na plataforma são a incidência dos ventos alísios, que possuem uma direção preferencial NE, com variações para N e E, a presença da Corrente Costeira Norte Brasileira (CCNB), que transporta as águas da plataforma continental externa e do talude continental na direção NW, com uma velocidade que chega até 1,2m/s, e as correntes de maré que predominam na circulação da plataforma continental, junto ao litoral (RICHARDSON et al., 1994).

Os estuários são ambientes costeiros presentes ao longo de todo litoral paraense, particularmente na região nordeste do estado, estes se classificam como ambientes transicionais na interface continente-oceano que recebem os materiais provenientes da drenagem continental carreados pelos rios, atuando como filtros para os materiais particulados e dissolvidos no fluxo com sentido ao mar (DYER, 1995; SCHUBEL; CARTER, 1984). Dentre os sistemas costeiros, os estuários têm um elevado valor ecológico, social e econômico, funcionando como pólos de atração da atividade humana e, nas suas margens, desenvolveram-se algumas das maiores áreas metropolitanas do mundo (GOMES et al., 2009).

Grande parte da população mundial vive em zonas costeiras, e há uma tendência permanente ao aumento da concentração demográfica nessas regiões (CHHABRA; GEIST, 2006). A saúde, o bem-estar e, em alguns casos, a própria sobrevivência das populações costeiras depende das boas condições dos seus sistemas e ambientes, incluídas as áreas úmidas e regiões estuarinas, bem como as bacias de recepção e drenagem e as águas interiores próximas à costa (BRASIL, 1988). Em síntese, a sustentabilidade das atividades humanas nas regiões costeiras depende de um meio marinho saudável e vice-versa.

Algumas características antrópicas da zona costeira da Amazônia são: i) primeira área para conquista e ocupação da Amazônia, no período colonial pelos portugueses, com a criação dos estados do Maranhão e Grão Pará (REZENDE, 2006); ii) presença de

regiões metropolitanas com elevado índice populacional e altas taxas de ocupação humana na Amazônia (BECKER, 2010; BRASIL, 2017); iii) ampla presença de unidades de conservação para proteger os sistemas naturais e sociais (BRASIL, 2018); iv) investimentos do governo nacional para expansão dos portos (RODRIGUES; CASTRO, 2013).

O processo histórico de ocupação é caracterizado por problemas como: ocupações irregulares em encostas ou nas margens dos corpos d' água, a precariedade de abastecimento de água potável e de saneamento básico, inadequação e de má distribuição dos serviços e da infraestrutura no meio urbano (CARMO, 2014). Esse cenário também é evidenciado na região costeira do Pará, em particular na região metropolitana de Belém, localizada às margens de grandes sistemas estuarinos, o que motiva o tratamento diferenciado quando se discute mudanças climáticas globais e os efeitos das variações do nível médio do mar (NEVES; MUEHE, 2010).

Almeida e Jardim (2018, 2019) avaliaram os efeitos dos investimentos das políticas públicas, no desenvolvimento socioeconômico, urbano e turístico das praias do Crispim (Marapanim), Atalaia (Salinópolis) e Ajuruteua (Bragança) na região costeira do nordeste paraense, apontando o uso excessivo dos recursos naturais, a contaminação do lençol freático, ausência de serviços públicos, a poluição do solo, ocupação das Áreas de Proteção Permanente ¹(APP) e erosão costeira como os principais problemas ambientais encontrados, concluindo que os investimentos públicos realizados nos anos anteriores não contribuíram positivamente para o desenvolvimento socioeconômico, urbano e turístico destas praias. Assim, os efeitos negativos adicionam-se a prejuízos ambientais significativos, que comprometem o meio ambiente, a qualidade de vida e saúde humana, as atividades socioeconômicas, o potencial e a competitividade turística.

Nos centros urbanos e nas regiões metropolitanas situados na região costeira da Amazônia, encontra-se uma densidade populacional moderada, no entanto nas áreas afastadas dos núcleos urbanos há uma baixa densidade populacional, algumas áreas estão relativamente isoladas e/ou ocupadas por comunidades tradicionais de subsistência. (SZLAFSZTEIN; STERR, 2007; SILVA et al., 2007). A região costeira do estado do Pará apresenta 30 municípios (MMA, 2019), que estão situados na porção leste da região

¹ São áreas, cobertas ou não por vegetação nativa, localizadas na zona rural ou urbana, com a função ambiental de preservar os recursos hídricos, a paisagem, a estabilidade geológica e a biodiversidade, facilitar o fluxo gênico de fauna e flora, proteger o solo e assegurar o bem-estar das populações humanas (BRASIL, 2012).

costeira da Amazônia, pertencentes às mesorregiões do Nordeste Paraense, Metropolitana de Belém e do Marajó. Esta região possui uma área territorial de aproximadamente 50.332 km², com população estimada em 3.037.179 habitantes (IBGE, 2019). A região costeira paraense detém 36% da população em apenas 5% do território estadual, e grande parte dos municípios apresentam o Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) com indicador baixo a médio (PNUD, 2019).

Também na zona costeira do estado do Pará, encontra-se um “cinturão” de unidades de conservação de uso sustentável. Neste espaço encontram-se mais aproximadamente 12 ambientes naturais protegidos, classificados como unidades de conservação de uso sustentável, subordinando a dependência direta e/ou indireta de mais de 150 mil pessoas, que sobrevivem da retirada dos recursos florestais, a exemplo os: pescadores artesanais, coletores de caranguejo (MMA, 2019; PEREIRA et al., 2009).

1.1.3 Vulnerabilidade Socioambiental

O termo vulnerabilidade possui diferentes abordagens, mas pode ter pelo menos duas diferentes interpretações (CUTTER; BORUFF; SHIRLEY, 2003; ADGER, 2006; O'BRIEN et al., 2013). A primeira tem geralmente, um enfoque nos aspectos biofísicos, considerando que os mais vulneráveis estão em ambientes precários e que terão os efeitos físicos (das mudanças climáticas) mais dramáticos (LIVERMAN, 2001; TOMINAGA; SANTORO; AMARAL, 2009). A segunda interpretação é mais ampla, e considera a vulnerabilidade como um resultado de interações dos meios físico e social (O'BRIEN et al., 2013). A vulnerabilidade é influenciada por múltiplos fatores de processos ambientais, sociais, econômicos, políticos e culturais que interferem diretamente na percepção dos indivíduos e na sua capacidade de resposta frente aos efeitos adversos, assim busca compreendê-los é um pré-requisito para sua redução (BLAIKIE et al., 1994; CUTTER, 1996; O'BRIEN et al., 2004).

A abordagem do tema sobre vulnerabilidade no âmbito deste estudo foi fundamentada a partir do conceito clássico de risco, entendido como a probabilidade da ocorrência de um efeito adverso ao bem-estar social (UNISDR, 2009). Como componentes determinantes do risco têm-se os fatores físico-químicos e biológicos do ambiente circundante constituindo-se nos perigos (no caso deste trabalho, a conjunção dos fatores de mudanças climática – anomalias de precipitação, temperatura e aumento no nível dos oceanos, associando-os às vulnerabilidades socioambientais mensurados por meio de índices e indicadores).

Esta pesquisa se fundamentará no conceito de vulnerabilidade disposto por Blaikie et al. (1994) e Iwama, Batistella e Ferreira (2014), onde afirmam que a vulnerabilidade está diretamente associada à exposição de um grupo ou sociedade a um evento adverso e sua capacidade de resposta e adaptação frente a adversidade, sendo possível identificar as vulnerabilidades com um caráter interdisciplinar. A vulnerabilidade envolve uma combinação de fatores que determina o grau em que um grupo ou ambiente é colocado em risco por um evento discreto e identificável (ou uma série de tais eventos).

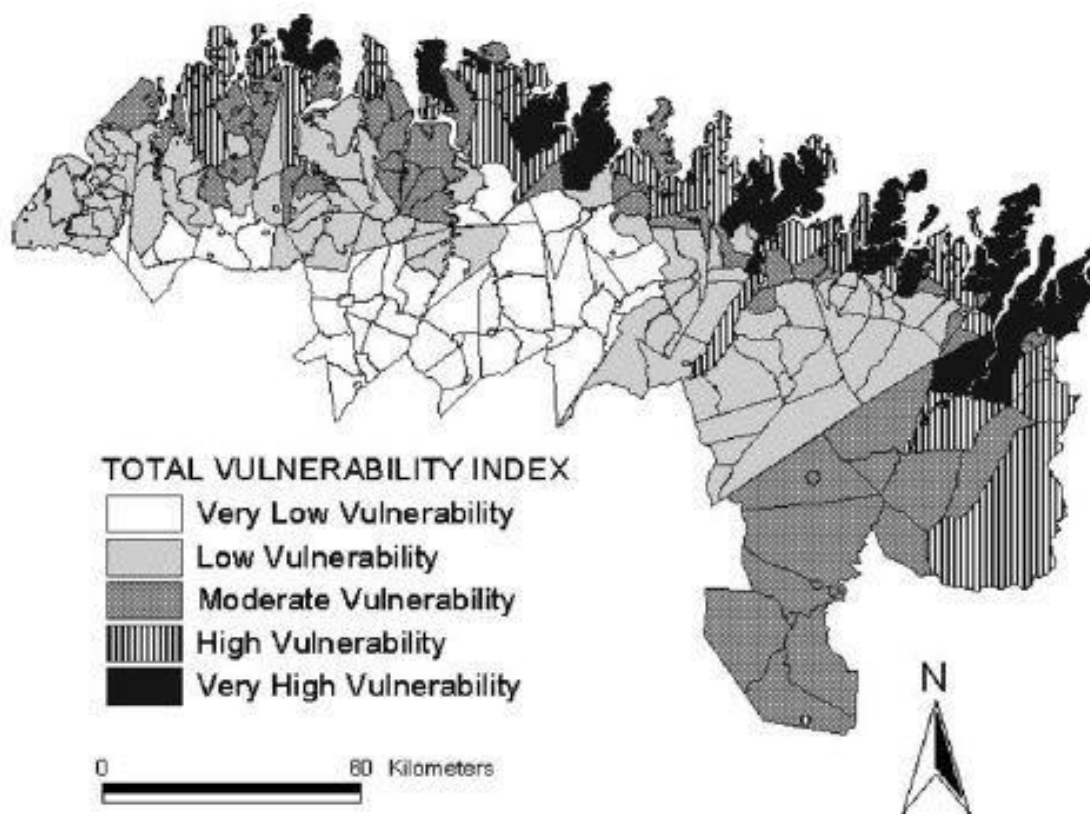
O termo vulnerabilidade socioambiental foi desenvolvido, a partir de inúmeras conceituações e desdobramentos teóricos acerca da vulnerabilidade, pressupondo-se que seu enriquecimento foi após os anos 80, por diversos teóricos que estabeleceram uma relação de causa e efeito, gerada entre a natureza e a sociedade, reconhecendo desta forma que os fatores de risco estão associados a certo grau de exposição e a uma situação crítica, natural ou social (D'ERCOLE, 1994; BLAIKIE et al., 1994). Deste modo, a vulnerabilidade pode ser entendida como um processo gerado por diversos fatores socioambientais, os quais, em conjunto, fragilizam pessoas, gerando consequências desastrosas como perdas materiais e/ou de vida (MAIOR; CÂNDIDO, 2014).

No Brasil, Deschamps (2006) e Almeida (2010) desenvolveram pesquisas e metodologias para tentar mensurar o grau de vulnerabilidade socioambiental em centros urbanos, considerando essas áreas como fontes de pesquisa, pois apresentam grandes concentrações populacionais, com fortes características econômicas e ambientais em pequenos espaços. Para Maior e Cândido (2014) a vulnerabilidade socioambiental no contexto urbano, contempla a sobreposição dos processos de expansão do núcleo populacional e urbano, que envolvem tanto quanto a dispersão espacial de grupos de risco social, degradação ambiental e falta de serviços e infraestrutura urbana.

Algumas metodologias desenvolvidas para analisar a vulnerabilidade em áreas urbanas na Amazônia trazem como características a utilização de índices e indicadores para a discussão do tema (REES, 1992; PEREIRA; VIEIRA, 2016). O emprego dos indicadores e os índices socioeconômicos, epidemiológicos e ambientais são ferramentas metodológicas acuradas para o entendimento e integração das múltiplas informações utilizadas na pesquisa sobre vulnerabilidade socioambiental (SANTOS; VITORINO; PIMENTEL, 2017). A diferença entre a utilização do índice e indicador está no entendimento de que o índice é um valor agregado final de um procedimento de cálculo onde se utilizam, inclusive, os indicadores como variáveis (SICHE et al., 2007).

Estudos de Gomes, Batista e Lima (2018), apresentam a dinâmica dos aspectos sociais, econômicos e ambientais das comunidades costeiras, propondo medidas para a gestão dessas regiões, com melhorias ao meio ambiente e na qualidade de vida da população local, a partir da utilização de um sistema metodológico de indicadores e variáveis. Szlafsztain e Sterr (2007) corroboram para a construção do índice de vulnerabilidade total de alguns municípios costeiros no nordeste paraense, baseados em indicadores. Estes autores formulam um índice composto por variáveis naturais e socioeconômicas, que propõe identificar e classificar os impactos naturais e socioeconômicos. Os municípios mais próximos ao litoral e/ou diretamente em contato com o oceano apresentam um índice muito alto de vulnerabilidade, especialmente em áreas estuarinas próximo a comunidades tradicionais e reservas extrativistas² (Figura 3).

Figura 3- Mapa do índice de vulnerabilidade total.



Fonte: Szlafsztain e Sterr (2007).

O processo de urbanização desordenado associada à concentração populacional são fatores que elevam a vulnerabilidade (HOGAN et al., 2016). No Brasil a taxa de

² Área utilizada por populações locais, cuja subsistência baseia-se no extrativismo e, complementarmente, na agricultura de subsistência e na criação de animais de pequeno porte (SNUC, 2000).

urbanização é de aproximadamente 84%, esse crescimento foi perceptível em todo território nacional nessa última década, incluindo o nordeste paraense (BRASIL, 2010). Segundo Hogan et al. (2016), o processo intenso de aglomeração urbana, denominada de “periferização” provoca sérias consequências sociais e urbanas como a deterioração dos recursos naturais e da qualidade ambiental, aumentando os problemas sociais. Neste contexto, a vulnerabilidade é também um conceito social, em que as populações afetadas são aquelas com menos condições de se protegerem dos riscos, como risco de inundação.

Os extremos nos níveis da chuva associado à concentração de pessoas em áreas urbanas podem ocasionar diversos problemas de ordens sociais, econômicas e ambientais. Estes problemas estão diretamente relacionados com as diferentes formas de uso da terra, a impermeabilização dos solos, a falta de infraestrutura e de planejamento urbano nas cidades, tornando-se os principais responsáveis pelas inundações (ZANELLA; SALES; ABREU, 2009). Cabe salientar que os extremos de chuva provocam inundações³ e enchentes⁴, sendo estes associados aos aumentos de casos de proliferação dos vetores de doenças e endemias como: Leptospirose, Hepatite A e Dengue (CORRÊA; COSTA; PEREIRA, 2016; GONÇALVES et al., 2016).

Neste contexto visualiza-se a necessidade de estudos que busquem compreender a variabilidade climática e suas implicações na sociedade, permitindo conhecer a vulnerabilidade das populações, quando submetidas a eventos e indicadores extremos. Atualmente, a literatura científica tem se utilizado de diferentes metodologias para estudos que visam à compreensão de tal termo, sendo empregado principalmente em âmbito social, econômico e ambiental (BRASIL, 2005; CONFALONIERI; MARINHO; RODRIGUEZ, 2009; QUINTÃO et al., 2017).

Recentemente, a literatura sobre a vulnerabilidade na região costeira do Pará está majoritariamente associada a condições naturais, com vista à identificação de áreas e locais de risco e adaptações para o gerenciamento costeiro (ESPÍRITO-SANTO; SZLAFSZTEIN, 2016). Todavia há necessidade de pesquisas que considerem os cenários de mudanças climáticas globais e seus impactos na vulnerabilidade socioambiental da região costeira do Pará (BRAGA; PIMENTEL; ROCHA, 2020).

³ Tipo particular de enchente, na qual a elevação do nível d'água normal atinge tal magnitude que as águas não se limitam à calha principal do rio, extravasando para áreas marginais, habitualmente não ocupadas pelas águas (CERRI; AMARAL, 1998).

⁴ Temporária elevação do nível d'água normal da drenagem, devido a acréscimo de descarga (CERRI; AMARAL, 1998).

1.2 Justificativa e interdisciplinaridade da pesquisa

Esta tese explicita que as mudanças climáticas afetaram negativamente as sociedades e ambientes costeiros, tornando-as mais expostas e vulneráveis aos intempéries climáticos. Assim, essa pesquisa se justifica, pois, visa contribuir com o conhecimento técnico-científico local para mitigar os problemas decorrentes das mudanças do clima, bem como buscar adaptações e medidas preventivas para a área de estudo, contribuindo para o preenchimento de lacuna nos estudos anteriores sobre o tema. O atributo interdisciplinar da tese consiste na aplicação de métodos de diversas áreas: climática – encontrada no cap. 2, a partir da variabilidade da precipitação e sua interface com os sistemas meteorológicos; ambientais; achados no cap. 3, a partir da influência das anomalias de precipitação nas variáveis hidrológicas e sociais, e encontradas no cap. 4, a partir da interação de dados sociais e cenários climáticos. Esta pesquisa leva em conta a temática das ciências ambientais, em conformidade com as linhas de pesquisa do Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais.

1.3 Objetivos e hipóteses

Geral:

Compreender como o clima influencia a vulnerabilidade social e ambiental na zona costeira do estado do Pará, a partir da variabilidade da precipitação.

Específicos:

- I. Investigar a variabilidade espacial e temporal da precipitação na região costeira da Amazônia oriental, a partir de dados de sensoriamento remoto (Capítulo 2);
- II. Analisar a distribuição das variáveis físicas e hidrológicas, durante períodos típicos e anômalos de clima, na região costeira no nordeste paraense (Capítulo 3);
- III. Mapear a vulnerabilidade socioambiental nos municípios costeiros do estado do Pará, por meio de índices e cenários de mudanças climáticas (Capítulo 4).

Hipóteses:

Para cada objetivo específico testamos uma hipótese:

- I. Há uma modificação na variabilidade espacial da precipitação em anos de extremos climáticos, ratificado pelos dados de sensoriamento remoto;
- II. As variáveis físicas modulam a hidrologia local, com maior interferência durante anos de ocorrência de extremos negativos de chuva;
- III. Os cenários climáticos interferem na vulnerabilidade socioambiental dos municípios costeiros do Pará, elevando sua vulnerabilidade de forma heterogênea no espaço.

1.4 Estrutura da tese

Esta tese investiga as possíveis interações das mudanças do clima, associadas aos processos socioambientais, com vista a vulnerabilidade na zona costeira do estado do Pará. Para tanto utiliza-se de metodologias interdisciplinares para cada capítulo, com foco na aplicação de dados de sensoriamento remoto em alta resolução para estimativa de precipitação, associação dos dados de coleta em campo de variáveis física (maré) e hidrológicas (salinidade, clorofila-a e turbidez), dados de precipitação e a utilização de Análise de Componentes Principais (ACP) para obtenção de distribuições espaciais e temporais e pôr fim a aplicação de cenários futuros para mudanças climáticas por meio do Índice de Vulnerabilidade Municipal (IVM).

A tese é apresentada de acordo com a normativa estabelecida pelo Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais (PPGCA), seguindo a estrutura organizacional: no capítulo 1, é realizado uma contextualização em amplo sentido, destacando as interfaces existentes entre clima, vulnerabilidade e os aspectos antrópicos e naturais ao longo da região costeira da Amazônia, com ênfase particular sobre a região costeira do Pará.

O capítulo 2 analisa a variabilidade da precipitação e dos principais padrões da chuva em diferentes escalas de tempo, para a região costeira do leste da Amazônia, associando-os aos sistemas meteorológicos precipitantes que atuam na região, baseados em métodos paramétricos, comparando a distribuição espaço temporal da chuva em anos atípicos de clima. Foram realizadas análises nas escalas mensais, sazonais e anuais da chuva na região costeira do Pará e formação dos principais modos de chuva para validação dos dados em alta resolução para os demais capítulos.

O capítulo 3 investiga a influência das chuvas nos dados de maré, salinidade, clorofila-a e turbidez em águas estuarinas e litorâneas, durante períodos típicos e anômalos quanto ao clima. Os dados de precipitação foram provenientes de estações meteorológicas de superfície e dados de alta resolução de sensoriamento remoto (CMORPH), tratados majoritariamente em laboratório. Os dados hidrológicos foram coletados em campanhas de campo por CTD em dois estuários (Caeté e Taperaçu) e uma praia (Ajuruteua).

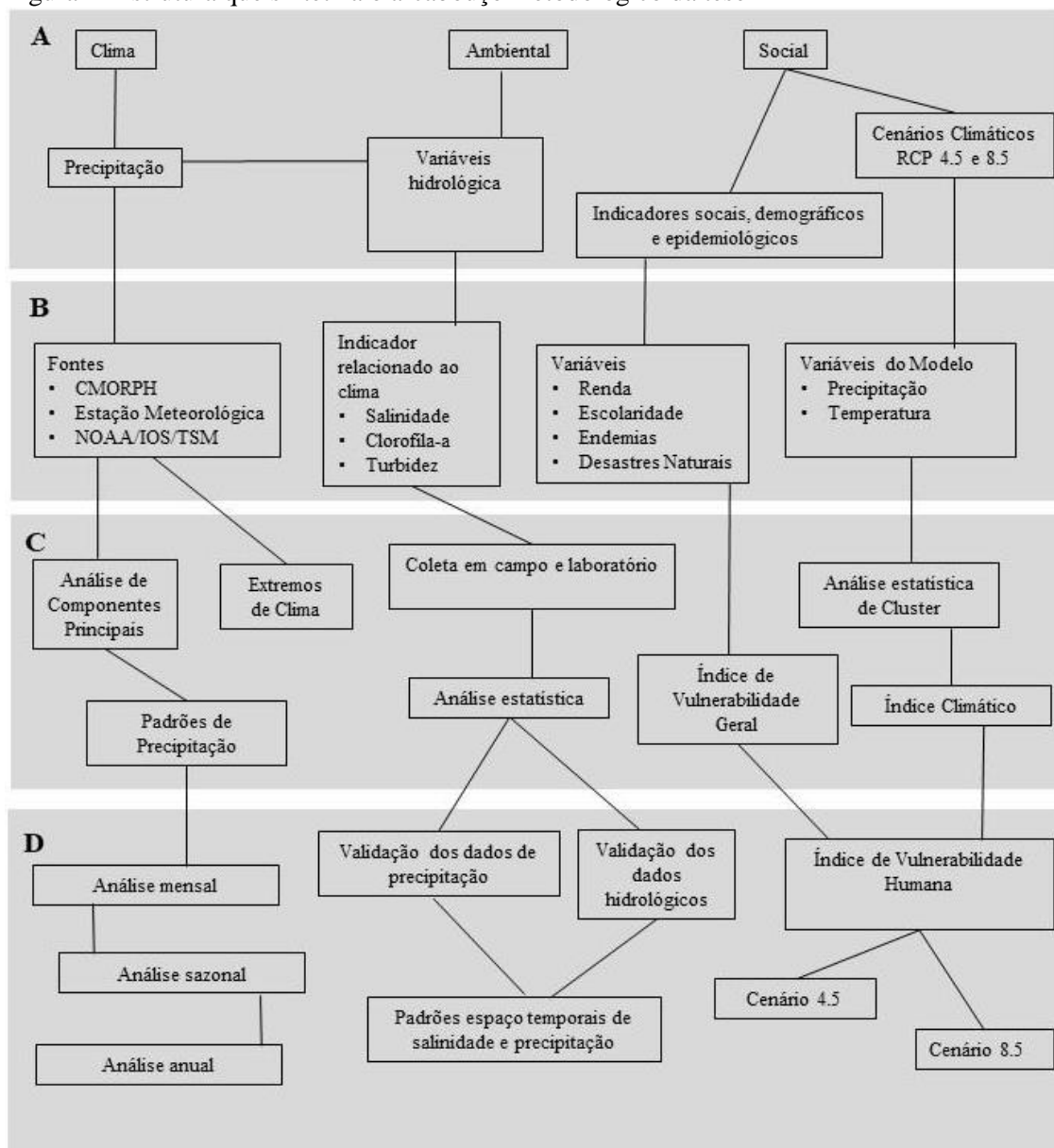
O capítulo 4 tem como foco a análise da vulnerabilidade para os municípios costeiros do estado do Pará, com base em um agrupamento de índices sintéticos, formado por indicadores socioeconômicos, epidemiológicos e climáticos. Esta análise combina os

dados socioambientais com os cenários climáticos RCP 4.5 e 8.5, para cada município seguindo a metodologia do Índice de Vulnerabilidade Municipal (IVM), verificando a distribuição espacial dos municípios a partir dos valores dos índices e indicadores sintéticos.

No capítulo 5 encontra-se a conclusão geral da tese, relatando os principais resultados dos diferentes capítulos. Também são apresentados os impactos e as implicações da pesquisa para o setor acadêmico, privado e comunidade civil, permitindo o preenchimento das lacunas e incitando a investigação do tema.

O esquema metodológico apresentado na figura 4, explicita: A: grandes áreas de interdisciplinaridade; B: variáveis e método; C: metodologia; D: resultados esperados:

Figura 4- Estrutura que sintetiza o arcabouço metodológico da tese



Fonte: Do Autor.

CAPÍTULO 2 VARIABILIDADE ESPAÇO TEMPORAL DA PRECIPITAÇÃO NA ZONA COSTEIRA DA AMAZÔNIA⁵

Resumo: Representações confiáveis sobre a variabilidade espaço temporal da precipitação são um dos principais fatores para alcançar o planejamento eficiente de políticas públicas. Atualmente as representações exatas da variabilidade das chuvas está severamente limitada a dados coletados por meio de pluviômetros, particularmente em grandes regiões e com escassez de dados – caso típico da região Amazônica. Neste cenário, esta pesquisa propõe investigar a variabilidade da precipitação em diferentes escalas de tempo, e obter os principais modos da chuva para uma região costeira da Amazônia, associando-os aos sistemas meteorológicos precipitantes que atuam na região. O estudo apresenta a aplicação do produto de sensoriamento remoto – CMORPH com dados de meia hora e 0,07 graus de latitude e longitude. A variabilidade espaço-temporal da precipitação foi representada pela climatologia dos tempos (mensais, sazonais e anuais), e para obtenção dos padrões de chuva utilizou-se a técnica de Análise de Componentes Principais (ACP). As estimativas obtidas pelo CMORPH evidenciaram de forma satisfatória a climatologia da precipitação para as distintas escalas de tempo. A ACP determinou a existência de um gradiente de precipitação nos dois principais modos pluviométricos, que explicam 88% da variância total dos dados. O primeiro modo, explica 83% dos dados, evidenciando o período: chuvoso e menos chuvoso da região, com a atuação dos sistemas precipitantes de grande escala: Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCANs). O segundo modo, explica 5% dos dados de chuva e está associado a ocorrência de sistemas de mesoescala, que ocorrem nos inícios das estações e ao posicionamento da ZCIT mais ao sul da região. O conhecimento da variabilidade da precipitação em alta resolução de forma contínua no tempo e no espaço, torna-se uma ferramenta eficaz para a tomada de políticas públicas a nível municipal, corroborando para estudos de modelagem e auxiliando na prevenção da vulnerabilidade climática.

Palavras-chave: Precipitação. Sensoriamento Remoto, Amazônia.

⁵ Publicado na Revista Brasileira de Climatologia. SANTOS, M. R. S.; VITORINO, M. I.; PEREIRA, L. C. C. Spatiotemporal variation in the precipitation of the Amazon coastal zone: use of remote sensing and multivariate analysis. Revista Brasileira de Climatologia, v. 25, p. 35 – 53, 2019. Qualis A2 – Ciências Ambientais.

Abstract: Reliable data on the spatiotemporal variability in precipitation patterns are vital to the development of effective public policies for environmental management. The analysis of the variation in rainfall rates is currently limited severely by the dependence on data from rain gauges, in particular in regions with a relatively sparsely-distributed network of meteorological stations, as in the Amazon region. The present study investigated the variability in the precipitation and the principal rainfall patterns at different time scales in the coastal zone of the Amazon region, and associated these patterns with the precipitant meteorological systems present in the region. The study was based on the application of remote sensing (Climate Prediction Center morphing method - CMORPH) data taken at half-hourly intervals on a 0.07 degrees latitude/longitude scale. The spatiotemporal variability in the region's precipitation was analyzed at different time scales (monthly, seasonal, and annual), with distribution patterns being assessed using a Principal Components Analysis (PCA). The estimates obtained from the CMORPH data provided a satisfactory overview of the precipitation climatology of the study region at the distinct time scales, compared to surface data. The PCA identified a precipitation gradient in the two principal pluviometric modes, which together explained 88% of the total variance in the data. The first mode explained 83% of the variance, with two distinct periods, a rainy season and a dry (or less rainy) period, which are influenced by large-scale precipitant systems, the Intertropical Convergence Zone (ITCZ) and High Level Cyclonic Vortices (HLCVs). The second mode, which explains 5% of the variance in the rainfall data, is associated with mesoscale systems that affect primarily the transition periods between the seasons, and depend on the southern extreme of the annual shift in the ITCZ. The understanding of the variation of precipitation patterns using high-resolution CMORPH data, with a comprehensive coverage in both time and space, provides an effective tool for the establishment of public policies at a municipal level, in particular the development of models, and the mediation of the vulnerability of local populations to climatic extremes.

Keywords: Precipitation, Coastal, Amazonia, Remote Sensing

2.1 Introdução

Estudos sobre a variabilidade espacial e temporal da chuva em regiões costeiras ainda são tímidos (ZAMBRANO-BIGIARINI et al., 2017), particularmente pois essas áreas constituem-se como espaços dinâmicos de interação, entre os sistemas continentais e oceânicos (RODRIGUEZ; WINDEVOXHEL, 1998). Estudos de Kousky (1980) apontam que a variação diurna da precipitação na região costeira do nordeste do Brasil, apresenta máximos noturno, provocados provavelmente pela convergência entre o fluxo médio onshore e a brisa terrestre offshore. Muitos estudos sobre precipitação estão fundamentados em dados de superfície, evidenciando que a representação da variabilidade espaço-temporal das chuvas pode estar severamente limitada aos dados pontuais, que servem de entrada para modelos climáticos e hidrológicos, e são geralmente obtidos por meio de interpolação da precipitação pontual (VERWORN; HABERLANDT, 2011; ROGELIS; WERNER, 2013).

O Brasil tem a maior linha de costa da América do Sul, compreende uma área de aproximadamente 8.500 km de extensão considerando todas as reentrâncias, baías e golfos (PEREIRA et al., 2009), sua localização biogeográfica neotropical favorece a manutenção de diversos ecossistemas locais, permitindo a integração de elementos naturais e antrópicos (SCHERER; SANCHES; NEGREIROS, 2010). O litoral Amazônico compreende cerca de 35% do litoral brasileiro, com particularidades naturais: uma das maiores áreas contínua de ecossistema de manguezal do mundo; aporte sedimentar da maior bacia hidrográfica do mundo; processos morfodinâmicos, como os regimes de macromarés, alto índice de precipitação (KJERFVE; LACERDA, 1993; GEYER et al., 1996; AMANAJÁS; BRAGA, 2012; PEREIRA et al., 2014;); e particularidades antrópicas: primeira área de ocupação na Amazônia e região de maior concentração populacional e urbana do norte brasileiro (BECKER, 2010; BRASIL, 2018).

Entre as particularidades naturais da zona costeira, a precipitação é uma variável bastante investigada porque induz outras variáveis climatológicas como a temperatura, umidade e escoamento superficial (MORAES et al., 2005). As chuvas na Amazônia, incluindo a região litorânea ocorrem predominantemente nas estações do verão e outono do hemisfério sul, caracterizando a estação chuvosa da região. Este período é influenciado pela atuação de diversos sistemas meteorológicos de distintas escala como: a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e Linhas de Instabilidades (LIs), que acoplados aos

mecanismos oceano-atmosfera: Oscilação Decadal do Pacífico (ODP), Oscilação do Atlântico Norte (OAN) e El Niño Southern Oscillation (ENSO) intensificam o quantitativo das chuvas locais (MOLION, 1987; COHEN; SILVA DIAS; NOBRE, 1995).

Levando em consideração o alto índice pluviométrico, considera-se que a região costeira da Amazônia apresenta poucas estações meteorológicas de superfície (BRASIL, 2018) o que tem limitado severamente estudos sobre a variabilidade espaço temporal da chuva em escalas refinadas. De acordo com estudos de Fitzjarrald et al. (2008) e Cohen et al. (2014), as séries climatológicas e os dados de precipitação da região amazônica, são baseados majoritariamente nas medições de estações de superfície, que não contabilizam as chuvas induzida pela brisa fluvial e outros sistemas de escala regional e local. Estudos de Woldemeskel, Sivakumar e Sharma (2013) apresentam que em países em desenvolvimento e regiões de difícil acesso – caso da região amazônica - geralmente há apenas uma rede esparsa de estações meteorológicas disponíveis e, portanto, os campos espaciais de precipitação obtidos estão sujeitos a incertezas ainda maiores.

Neste cenário, a fim de superar algumas das limitações sobre medições de precipitação em superfície, os dados de precipitação baseadas por meio de técnicas de sensoriamento remoto fornecem uma fonte alternativa promissora (ZAMBRANO-BIGIARINI et al., 2017). Os dados de sensoriamento remoto são amplamente utilizados em pesquisas para regiões costeiras em diversas parte do mundo (CRACKNELL, 1999; MALTHUS; MUMBY, 2003), estas pesquisas apontam a aplicação a detecção remota como ferramenta eficaz, em observar e avaliar os processos oceânicos, meteorológicos e continentais, principalmente em áreas com ausência de dados de superfície ou em grandes extensões (TRALLI et al., 2005; TOMLINSON et al., 2011). O CMORPH é um produto de sensoriamento remoto que usa estimativas de precipitação derivadas de micro-ondas passivas, que se propagam no espaço utilizando vetores de movimento, com a melhor resolução de dados espaço temporais para precipitação (JOYCE et al., 2004; ZEWELDI; GEBREMICHAEL, 2009, HAILE et al., 2015).

Esta pesquisa teve como objetivo investigar a variabilidade espacial e temporal da precipitação em diferentes escalas de tempo, e obter os principais modos da chuva, buscando associá-los a atuação dos sistemas meteorológicos precipitantes que atuam na região. Para tanto utiliza-se dados de sensoriamento remoto da técnica CMORPH com alta resolução espacial (8Km) e temporal (30min) para uma região costeira da Amazônia oriental, durante o período de 1998 a 2016. Este conhecimento possibilitará ser aplicado

para outras regiões costeiras do Brasil ou do mundo, que não possuam estações de superfície ou tenham baixa qualidade/quantidade de dados de precipitação, assim espera-se encorajar a utilização de dados de sensoriamento remoto de alta resolução para futuras pesquisas, possibilitando o subsídio de políticas públicas para os municípios costeiros.

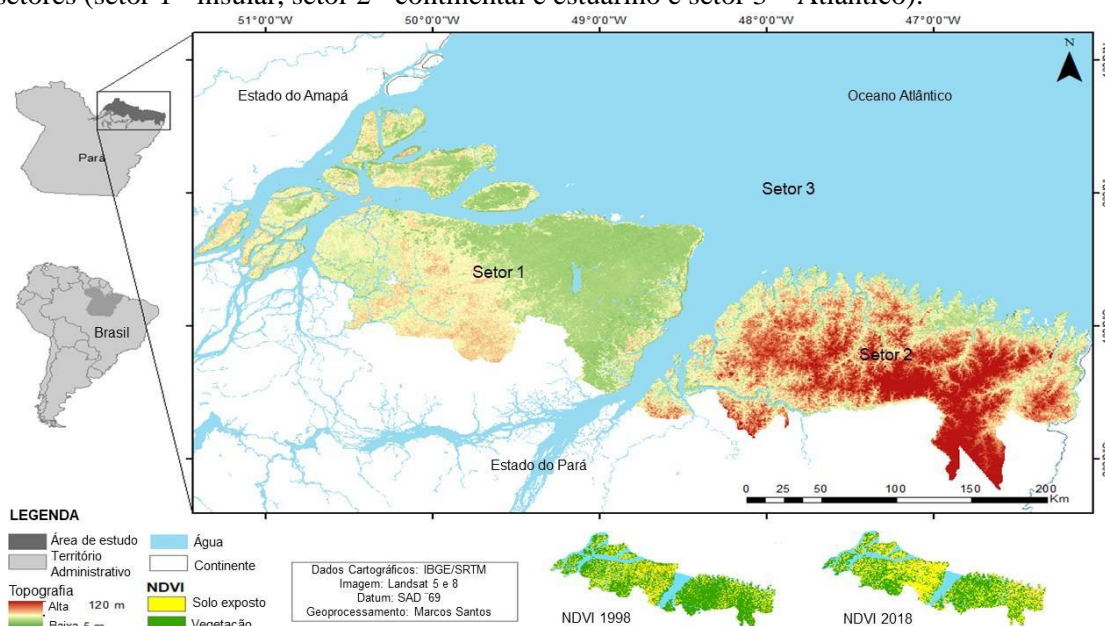
2.2 Material e métodos

2.2.1 Área de estudo

A área de estudo é uma parte da costa amazônica, localizada no norte do estado do Pará (lat. 1°00'00" N - 2°30'00" S e long. 51°30'00" W e 46°00'00" W), cobrindo uma área de 69.986.330 km². Essa área agrega um total de 3.664.593 habitantes dentro de 47 municípios, abrangendo quase 49% do total de habitantes em apenas 6% da área territorial do estado (IBGE, 2018).

A figura 5 mostra os três setores que envolvem a área de estudo, o setor insular (setor 1), o setor continental e estuarino (setor 2) e o setor atlântico (setor 3). Em comparação com índice de vegetação (NDVI – 1998 a 2018), o uso da terra é mínimo no setor 1 e mais intenso no setor 2, principalmente nas áreas mais povoadas e urbanizadas. O setor 3 foi designado para verificar a distribuição da chuva sobre o oceano que pode interferir nos processos costeiros. A topografia apresenta baixa elevação (Figura 2.1) com valores variando de poucos metros (setor 1) a 120 m (setor 2).

Figura 5- Região costeira do estado do Pará, destacando elevação digital, área coberta e os três setores (setor 1 - insular, setor 2 - continental e estuarino e setor 3 – Atlântico).



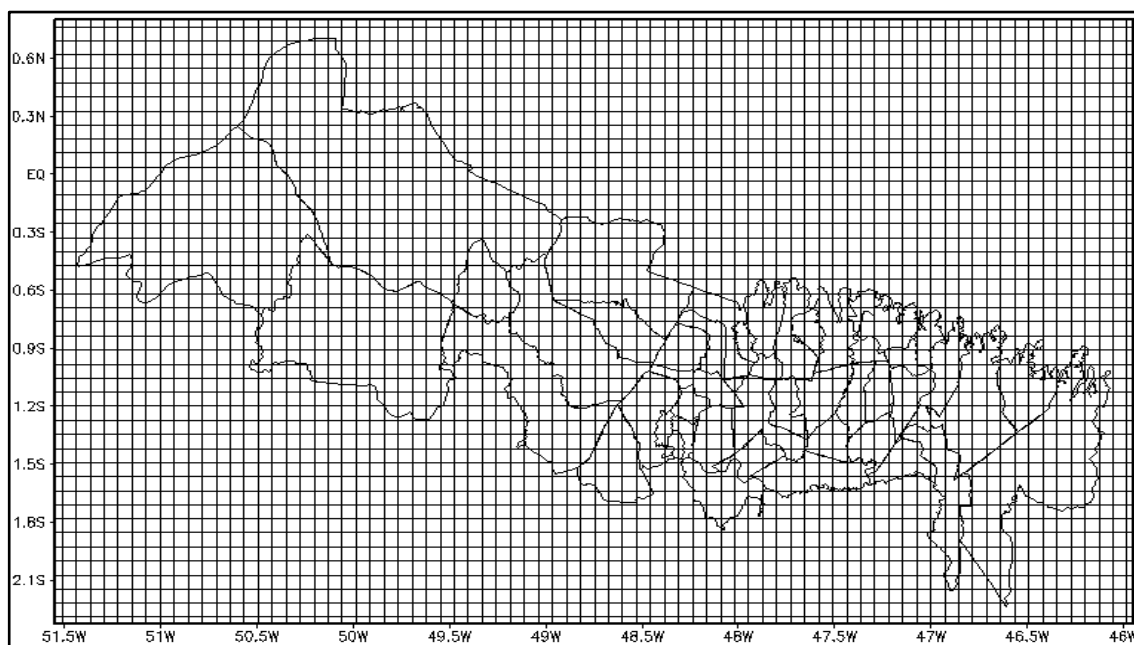
Fonte: Do autor.

Nas áreas de menor altitude estão presentes uma grande variedade de ambientes, como praias, estuários, manguezais, floresta de várzea, e pântanos de água doce e salobra, entre outros. O clima local é equatorial úmido, com valores de precipitação anual normalmente entre 2.000 e 3.000 mm, e as médias anuais de temperatura estão em torno de 26-28°C (BRASIL, 2018). As flutuações na Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) são o principal fator responsável pela precipitação local, que é marcada por duas estações principais, a estação chuvosa normalmente entre dezembro a junho, e a estação menos chuvosa nos outros meses.

2.2.2 Dados

Foi utilizada pela primeira vez a técnica de estimativa de precipitação (CPC MORPHing) em alta resolução espacial (8 x 8 km) e frequente resolução temporal (30 min) na análise espaço temporal da região costeira do Pará (Figura 6). As séries temporais de precipitação foram analisadas mensalmente, sazonalmente e anualmente entre janeiro de 1998 e dezembro de 2016. Além disso, examinou-se as séries temporais da estação de superfície, que estão presentes na área de estudo, obtidas do Instituto Brasileiro de Meteorologia entre janeiro de 1998 e dezembro de 2016. Correlações entre satélite e estação foram feitas mediante medições para testar a eficiência dos dados obtidos em áreas sem estação meteorológica.

Figura 6- Grade regular do CMORPH.



Fonte: Organizado pelo autor baseado em (CMORPH/NOAA, 2017).

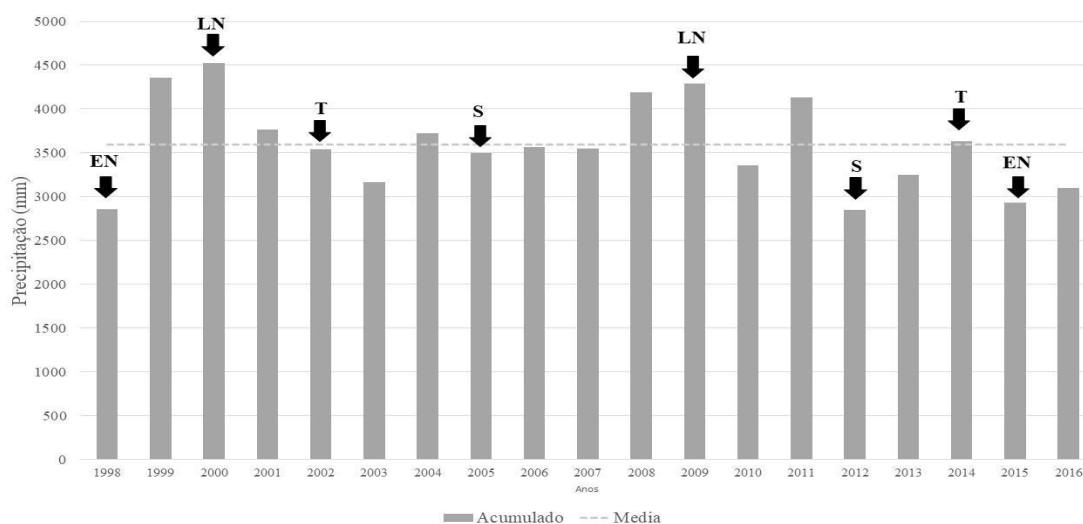
Para evidenciar eventos climáticos como El Niño, La Niña e Seco foram utilizadas informações da Administração Nacional Oceânica e Atmosférica (NOAA).

2.2.3 Metodologia

Para análise espacial da distribuição da chuva, foi utilizado o recorte da área de estudo dividido em 3 (três) setores. Na análise temporal utilizou-se os dados CMORPH de meia em meia hora. Os dados foram acumulados nas escalas de tempo: mensal, sazonal e anual, durante o período de 1998 a 2016, portanto, a comparação dos dados espaciais foi direta de grid para grid entre o produto. Na análise mensal realizou-se a climatologia dos meses do ano durante o período estudado. A análise da climatologia sazonal fundamentou-se em quatro períodos: início das chuvas (dezembro, janeiro e fevereiro), meses mais chuvosos (março, abril e maio), meses de transição e início do período seco (junho, julho e agosto), e meses mais secos (setembro, outubro e novembro).

A análise anual consistiu na distribuição da chuva em anos típicos e atípicos. Os anos típicos foram considerados neutros, tornando-se referência para análise de estudo. Os anos atípicos considerados neste trabalho foram anos secos ou de ocorrência de extremos climáticos (El Niño e La Niña), ambos foram classificados a partir dos acumulados anuais, com valores acima ou abaixo da média climatológica (estes valores foram obtidos pela média aritmética dos pixels da área de estudo) e ratificados pelos valores do Índice de Oscilação Sul e literatura vigente (Figura 7).

Figura 7- Precipitação média anual registrada na área de estudo entre 1998 e 2016, mostrando os anos selecionados como atípicos para os fins do presente estudo (EN = El Niño; NL = La Niña; D = Seca; T = Típico).



Fonte: Organizado pelo autor baseado em (CMORPH/NOAA, 2017).

Para a análise da ocorrência de extremos climáticos, utilizou-se o Índice de Oscilação Sul (IOS). O IOS é uma indicação numérica do desenvolvimento e da intensidade do El Niño Oscilação Sul (ENOS), calculado usando as diferenças médias de pressão ao nível médio do mar entre Tahiti e Darwin. Então classificou-se os anos de ENOS a partir da variação superior de $-0,5^\circ$ em uma constante acima de 3 meses para ocorrência do El Niño e o valor igual superior de $+0,5^\circ$ em uma constante acima de 3 meses para anos de La Niña, de acordo com a metodologia proposta pela (NOAA, 2017).

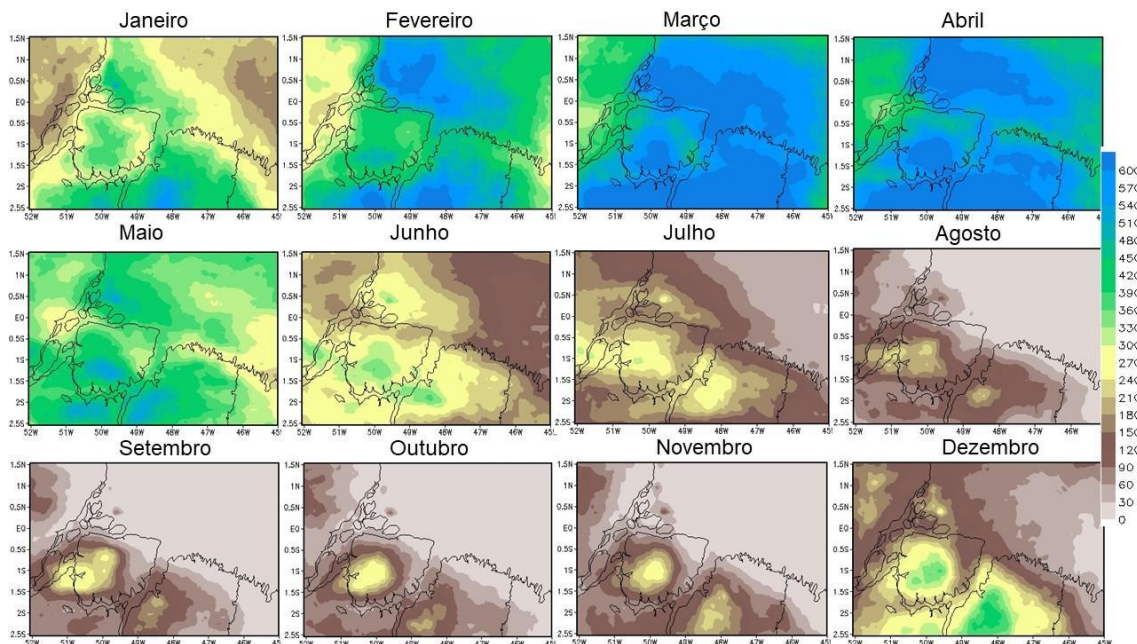
Os padrões de precipitação, foram estabelecidos por meio dos dados mensais em ponto de grade para a área de estudo, durante o período de janeiro de 1998 a dezembro de 2016, aplicando aos dados, o procedimento estatístico de multivariada em Análise de Componentes Principais (ACP). A escolha do número de Componentes Principais (CPs) foi baseada no critério de truncamento de Kaiser. Os testes de significância de seus coeficientes foram baseados na esfericidade de Bartlett e KMO (WILKS, 2006). A significância estatística das tendências nas séries dos autovalores (coeficientes de expansão temporal) foi determinada segundo o teste de Mann-Kendall (MANN, 1945; KENDALL, 1975) e a significância estatística dos autovetores (coeficientes de expansão espacial) plotado está de acordo com o test t de student. A matriz de dados foi organizada conforme pesquisa (AMANAJÁS; BRAGA, 2012; SANTOS et al., 2016).

2.3 Resultados

2.3.1 Análise mensal

Verifica-se na Figura 8 a variabilidade da chuva, elucidando maiores quantitativos nos meses de janeiro a junho com acumulados entre 270 mm e 600 mm. Durante os meses de julho a dezembro foram registrados os menores quantitativos de chuva, com variação nos acumulados entre 0 mm e 120 mm. O setor 1 apresentou os maiores e menores acumulados de chuva, durante os meses de março e setembro com valores acima de 540 mm e abaixo de 60 mm, respectivamente. No setor 2 os maiores e menores acumulados de chuva foram registrados durante os meses de março e outubro com valores de acima de 570 mm e abaixo de 30 mm. Para o setor 3 os maiores e menores acumulados de chuva foram registrados durante os meses de março e novembro com valores de acima de 600 mm e de 0 mm. Na linha de costa da região, houve um predomínio de acumulado abaixo de 30mm, durante os meses de agosto a novembro.

Figura 8- Climatologia mensal da precipitação na zona costeira da Amazônia, para o período de 1998 a 2016.

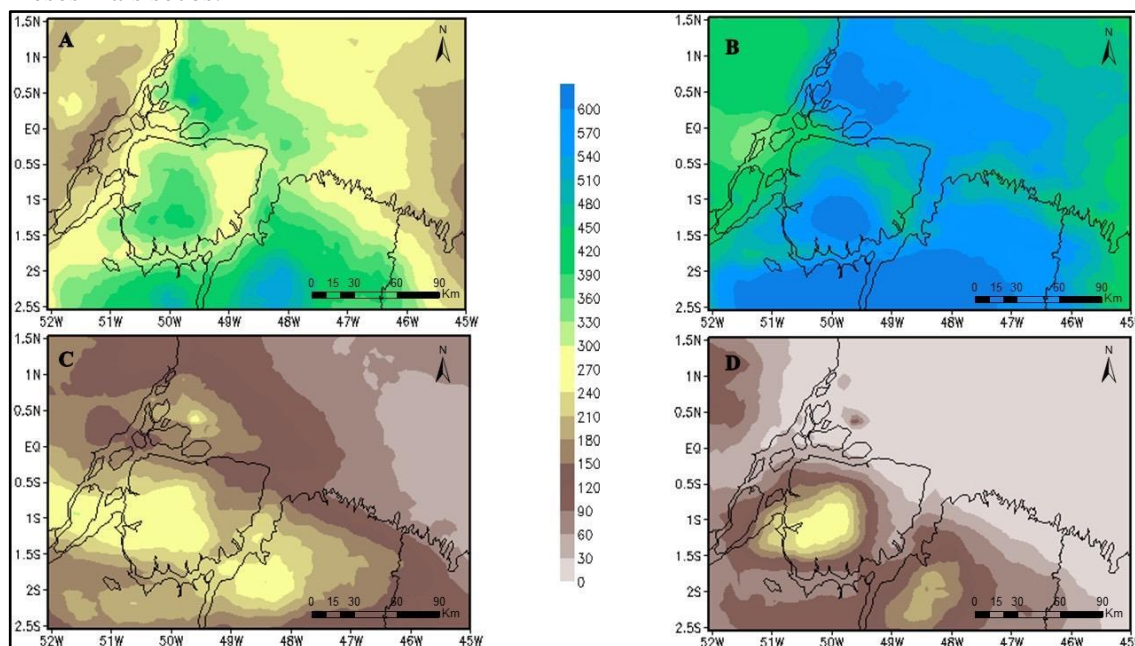


Fonte: Do autor.

3.3.2 Análise sazonal

Durante o início das chuvas percebe-se que os acumulados de precipitação variam entre 240 mm na linha de costa e 500 mm no interior do continente, é notório um gradiente zonal com mínimos de chuva sobre o setor 3 e máximos no setor 1 e 2 (Figura 9A). A distribuição espacial da precipitação muda intensamente durante os meses mais chuvosos, tornando a precipitação quase uniforme, com acumulados entre 460 mm e 600 mm nos setores 1, 2 e 3 (Figura 9B). Nos meses de transição e início do período menos seco a região apresenta acumulados entre 40 mm no setor 3 e acima de 120 mm nos setores 1 e 2 (Figura 9C). Nos meses mais secos, grande parte da região tem um mínimo de acumulado de chuva, principalmente sob o setor 3. Na área continental, correspondente aos setores 1 e 2, a linha de costa apresenta variação entre 0 e 30 mm (Figura 9D).

Figura 9- Climatologia sazonal da precipitação na zona costeira da Amazônia. (A) início das chuvas, (B) meses mais chuvosos, (C) meses de transição e início do período menos seco e (D) meses mais secos.



Fonte: Do autor.

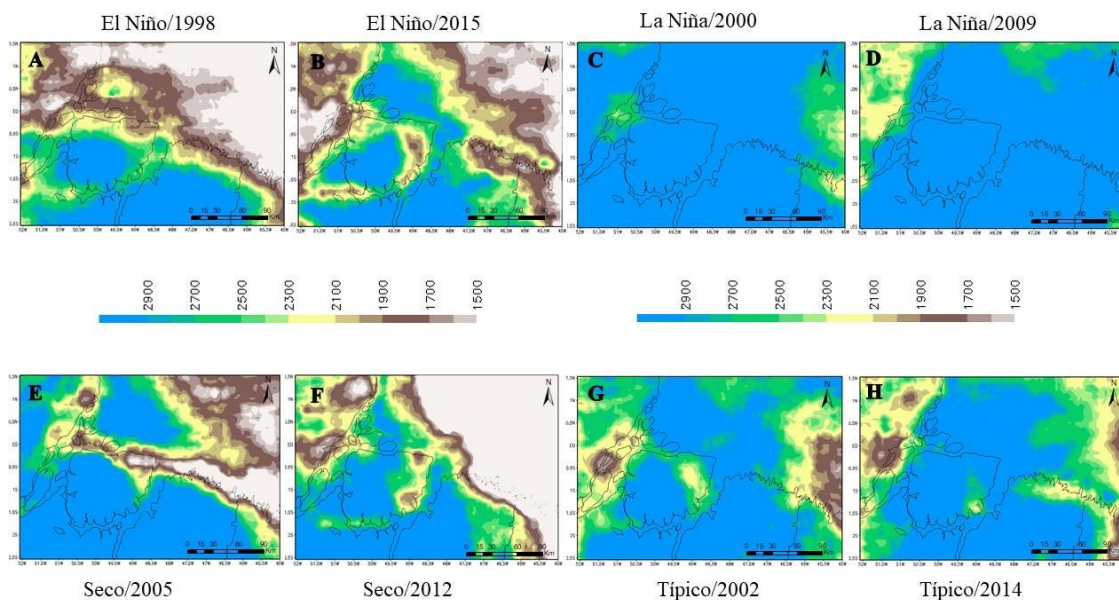
3.3.3 Análise anual

Nos anos observados de ocorrência de El Niño (Figura 10A-B) verifica-se grande heterogeneidade da chuva na região com máximos de 2000 mm anuais sobre os setores 1 e 2 e mínimos de 1500 mm no setor 3. Na linha de costa houve uma variação entre 1000 e 1800 mm anuais. No entanto, o El Niño de 2015 apresentou uma distribuição da chuva mais intensa sob o continente (setores 1 e 2) próximo à linha de costa com acumulados de 2000 mm (Figura 10B). Para os anos de La Niña, a distribuição de chuva é bastante homogênea para os setores 1, 2 e 3, com acumulados anuais acima de 3000 mm (Figura 10C-D). Para a região em análise durante os episódios as La Niña não foram apresentadas grandes variações espaciais, somente no estado do Amapá, região noroeste da área de estudo apresentou um acumulado baixo em torno de 2300 mm (Figura 10D).

Nos anos observados com ocorrência de secas (Figura 10E-F), a chuva apresenta uma distribuição heterogênea com acumulados abaixo de 1000 mm sob o oceano (setor 3) e acima de 2900 mm no continente (setor 1 e 2), elucidando uma espacialização meridional. A seca de 2012 foi mais intensa na região da linha de costa, com acumulados anuais abaixo de 1000 mm (Figura 10F). Nos anos neutros e/ou típicos, a chuva apresenta acumulados entre 1500 mm nas áreas a leste do setor 2 e oeste do setor 1, com acumulados de 2700 mm ao centro na área de interesse (Figura 10 GeH). No ano neutro de 2014, a

área de com maior acumulado de chuva na região de linha de costa se expandiu com acumulados acima de 2100 mm em comparação com o ano de 2002 (Figura 10H).

Figura 10- Distribuição espaço-temporal da precipitação em anos atípicos (A) El Niño/1998, (B) El Niño/2015, (C) La Niña/2000, (D) La Niña/2009, (E) Seca/2005, (F) Seca/2012, (G), Neutro/2002 e (H) Neutro/2014.



Fonte: Do autor.

3.3.4 Modos da precipitação

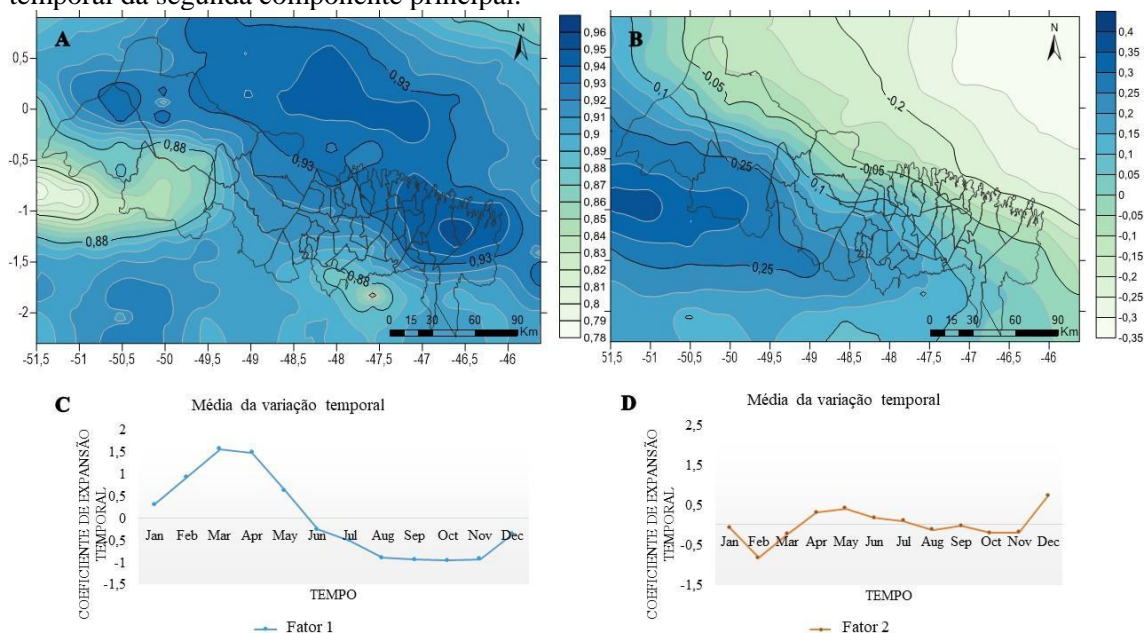
A seguir são analisados os principais fatores espaciais e temporais obtidos a partir da aplicação da ACP aos dados mensais em alta resolução de estimativa de precipitação do CMORPH. As duas primeiras Componentes Principais (CPs) explicaram 88% da variância total dos dados obtidos para toda área estudada.

A figura 11A corresponde ao padrão espacial do primeiro fator (83%), as correlações positivas indicam maior precipitação, com valores de 0,98 e 0,78 para toda a área de estudo. Os maiores coeficientes: 0,96 a 0,93 se concentram em um modo zonal em duas grandes “células” a primeira sob o oceano (setor 3) defronte aos municípios da ilha do Marajó (setor 1), e a segunda sobre os municípios do nordeste paraense (setor 2). Os menores coeficientes, com valores de 0,8 a 0,78 seguem o padrão zonal com duas “células” que indicam menor precipitação, a primeira a sudoeste da ilha do Marajó (setor 1) e a segunda a sudoeste dos municípios do nordeste paraense (setor 2). A figura 11B corresponde ao padrão espacial do segundo fator (5%), com correlações positivas de 0,5 e negativas de -0,35 em toda área de estudo. Este padrão meridional tem seus valores negativos sob o oceano (setor 3), com menor concentração de chuva, e positivos à medida

que adentra o continente (setor 2), com maior concentração da precipitação, elucidando uma “célula” a sudoeste da ilha do Marajó (setor 1).

As Figuras 11 C e D ilustram a variabilidade média temporal dos dois primeiros fatores da CP, que explicam 88% da variância dos dados. A Figura 11C representa o primeiro fator temporal, que corresponde a 83% da variância total dos dados, onde as contribuições positivas aparecem durante os meses de janeiro a maio com valores superiores a 1,5 no mês de março. Os valores negativos aparecem durante os meses de junho a dezembro com valores superiores negativos no mês a -0,9 em outubro e novembro. Na figura 11D é evidenciado o segundo fator temporal da 2 CP, com explicação de 5% da variância total dos dados, seus valores negativos oscilam entre -0 a -0,8 durante os meses de janeiro a março e depois em agosto a novembro com valores de -0,1. Os valores positivos são encontrados durante os meses de abril (0,3) a julho (0,08) e depois em dezembro. Nesta variação a maior contribuição positiva ocorreu durante o mês de dezembro (0,7) e a negativa em fevereiro (-0,8).

Figura 11- (A) Modo espacial da CP1 com 83%; (B) Modo espacial da CP2 com 5%; (C) Variabilidade média temporal da primeira componente principal e (D) Variabilidade média temporal da segunda componente principal.



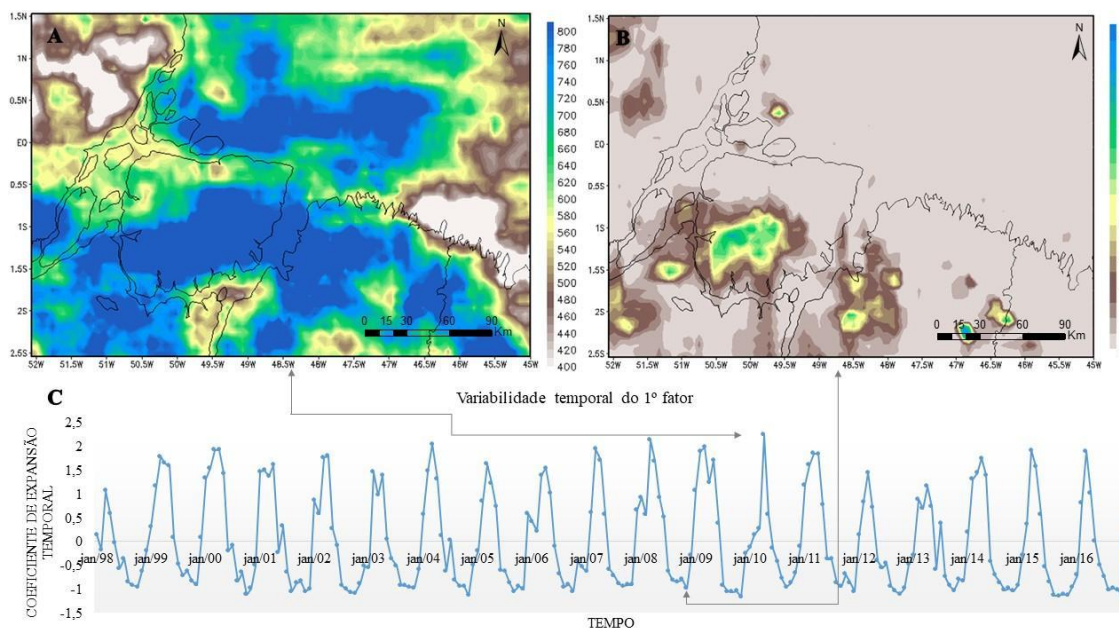
Fonte: Do autor.

Para ratificar os resultados apresentados nos modos, verificou-se os maiores coeficientes positivos e negativos em cada componente, elegendo a acurácia da ACP e a representação da técnica do CMORPH. Visualiza-se na espacialização heterogênea da imagem positiva (Figura 12 A) uma concentração de precipitação que varia de 700 a 800 mm de chuva mensal para duas áreas: sob o oceano (setor 3) e sob o continente (setor 1 e

2) elucidando de forma satisfatória o modo principal, onde se tem duas ‘células’ de grande precipitação. A imagem negativa (Figura 12 B) apresenta uma variação da precipitação com valores menores que 20 mm mensais para toda a região costeira, com exceção de uma área localizada ao sul da ilha do Marajó (setor 1) que tem um acumulado de 140 mm.

A Figura 12 C ilustra a contribuição temporal da primeira CP, apresentando o mês de abril de 2010, com o maior coeficiente temporal positivo (2,24) e o mês de novembro de 2008, com maior coeficiente temporal negativo (-1,16). Os coeficientes com valores positivos indicam maior concentração de chuva, quando há uma diminuição dos coeficientes com valores negativos, indica-se uma redução da precipitação com inversão do padrão principal, onde havia mais chuva e torna-se menos chuvoso.

Figura 12- (A) Distribuição mensal da precipitação com maior correlação do padrão verificada pelo CMORPH – abril/2010; (B) Distribuição mensal da precipitação com menor correlação do padrão verificada pelo CMORPH – novembro/2008; (C) variabilidade temporal da primeira CP.

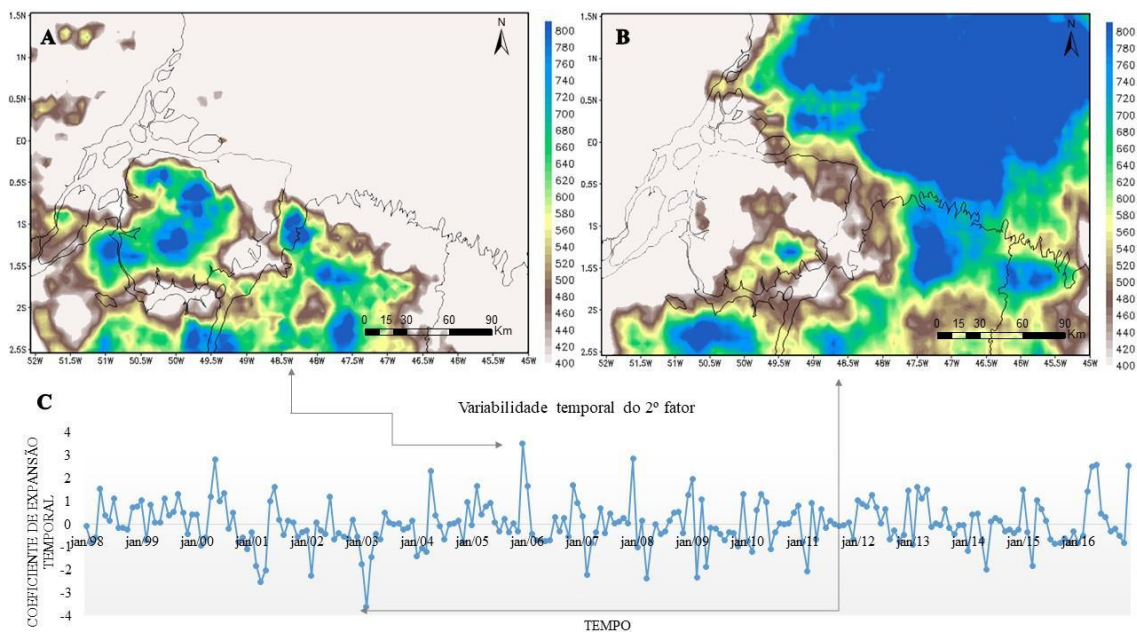


Fonte: Do autor.

Visualiza-se na (Figura 13A) a concentração de precipitação que varia de 400 a 760 mm de chuva mensal para áreas sob o continente (setor 1 e 2), e ausência de precipitação sob o oceano (setor 3). A Figura 13B apresenta uma variação da precipitação com valores máximos sob a região do oceano (setor 3) com 800 mm e mínimos na região continental com 400 mm (setor 1 e 2). A Figura 13C apresenta a contribuição temporal da segunda CP, elucidando o mês de dezembro de 2005, com o maior coeficiente temporal positivo (3,5) e o mês de fevereiro de 2003, com maior coeficiente temporal negativo (-3,3). Os coeficientes com valores positivos indicam maior concentração de chuva, quando há uma

diminuição dos coeficientes com valores negativos indica-se uma redução da precipitação com inversão do padrão principal, onde havia mais chuva torna-se menos chuvoso.

Figura 13- (A) Distribuição mensal da precipitação com maior correlação do padrão verificada pelo CMORPH – dezembro/2005; (B) Distribuição mensal da precipitação com menor correlação do padrão verificada pelo CMORPH – fevereiro/2003; (C) variabilidade temporal da segunda CP.



Fonte: Do autor.

2.4 Discussão

Durante os meses do primeiro semestre as chuvas se concentraram com acumulados entre 100 a 600 mm, e para os meses do segundo semestre com acumulados de 0 a 200 mm, este resultado ratifica o já sabido pela literatura, onde se tem na Amazônia dois períodos de precipitação: chuvoso e menos chuvoso (FISCH et al., 1998; MOLION, 2000; SANTOS et al., 2016). No entanto os dados do CMORPH, por ser em escala refinada conseguem apresentar mais especificamente a distribuição espaço temporal da chuva em áreas que seriam inferiormente interpoladas por dados de estações. Ao analisar a porção sul do setor 2, onde se encontra a região metropolitana de Belém, verifica-se que a partir do mês de dezembro as chuvas começam a apresentar maiores acumulados, e a norte do setor 2 os maiores acumulados se estabelecem a partir de janeiro (MORAES et al., 2005).

Durante os meses de início das chuvas e meses mais chuvosos, o sistema que mais contribui para a distribuição da precipitação é a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) (MOLION, 1987), todavia há também a influência dos Vórtices Ciclônicos de

Altos Níveis (VCANs) que interfere na precipitação regional (REIBOTA et al., 2010). Para os meses de transição e início do período menos seco e meses mais secos, os maiores quantitativos de chuva são formados por sistemas de mesoescala como as linhas de instabilidade e os sistemas locais de brisa (COHEN; SILVA DIAS; NOBRE, 1995; GERMANO et al., 2017). A precipitação na região é resultado do acoplamento de diferentes mecanismos oceano atmosfera: Oscilação do Atlântico Norte (OAN), Oscilação Década do Pacífico (ODP), El Niño Oscilação Sul (ENOS) (HURRELL et al., 2008) e sistemas meteorológicos que ocorrem em tempo e escalas distintas, esta interação provoca uma grande variabilidade espacial e temporal de chuva na região (MARENGO et al., 2001; NOBRE et al., 2009).

A diferença entre o máximo dos seis primeiros meses do ano (600mm) e o mínimo dos últimos seis meses (0mm) é provocada pela ausência de grandes sistemas precipitantes deixando a atmosfera livre (SANTOS et al., 2016). Estudos de Amanajás e Braga (2012) indicam que apesar da chuva apresentar um período sazonal fortemente definido, há uma variação entre os máximos e mínimos ao longo da região costeira, o que provoca a formação de regiões homogêneas em áreas e períodos distintos. A homogeneização da precipitação em diferentes áreas nas regiões costeiras, é uma ação motivadora para a pesquisa, pois a espacialização da chuva se comporta de forma diferente em uma região quase homogênea (litoral). Neste sentido, os resultados deste estudo refinam e corroboram com a pesquisa de Amanajás e Braga (2012) elucidando o conhecimento dos padrões sazonais de chuva, auxiliando na gestão de políticas públicas e minimizando a vulnerabilidade climática a partir dos quantitativos em mm para os municípios da região.

Os dados mensais, sazonais e anuais do CMORPH, apresentaram superestimava durante os primeiros seis meses- janeiro a junho, com acumulados entre 360 mm e 600 mm. Estudos de Behrangi et al. (2011) e Sodré et al. (2013), mostram que os dados do CMORPH tende a superestimar a quantidade de precipitação, durante o período chuvoso que corresponde às estações de início das chuvas e meses mais chuvosos, período este que a Amazônia recebe maior incidência solar. Pesquisa associada a utilização do CMORPH, nos Estados Unidos em escalas de tempo diária, relatam que durante as estações quentes esta técnica superestima significativamente a precipitação (TIAN et al., 2007).

O desempenho do CMORPH é dependente da estação, CMORPH superestima significativamente durante as estações quentes (dezembro-maio) e subestima

ligeiramente durante as estações frias (junho-novembro), corroborando com os resultados apresentados por Zeweldi e Gebremichael (2009). Em comparação com outros produtos derivados de sensoriamento remoto para precipitação o CMORPH apresenta a maior subestimação de chuva para quase todas as escalas de tempo, pois não utiliza dados de precipitação observados para calcular suas estimativas (ABERA et al., 2016; RINGARD et al., 2015; LO CONTI et al., 2014).

Durante os anos de El Niño a distribuição da chuva é heterogênea na região da Amazônia oriental, induzindo uma diminuição no quantitativo de precipitação nessa região se comparados a anos de La Niña ou anos neutros. De acordo Grimm e Tedeschi (2011) e Sun et al. (2015), a frequência de anos atípicos de precipitação é diferenciada em anos ocorrência de El Niño e La Niña para regiões costeiras. Chen; Zha (2018), associa em sua pesquisa os casos de erosão em uma província no litoral da China, onde indica que a maior erosividade do solo está ligado ao fenômeno El Niño. Os dados anuais do CMORPH indicaram uma subestimativa em anos considerados El Niño ou Seco (ex., 1998, 2005, 2012, 2013 e 2015), e o contrário é observado em anos típicos ou de La Niña (ex., 2000, 2009 e 2011). As condições extremas de clima provocadas pela ocorrência do ENOS, também interferem nos sistemas hidrodinâmicos e hidrológicos das regiões estuarinas e de praias (PEREIRA et al., 2013; MORTLOCK; GOODWIN, 2016; PEREIRA et al., 2017).

No que tange aos padrões de chuva, o mais significativo apresenta, máximos positivos de precipitação durante os meses janeiro a maio para a região costeira podem estar associados com a presença da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) (SANTOS et al., 2016; SANTOS et al., 2017). A ZCIT é um sistema de grande escala que atua nos trópicos, sendo a principal responsável pelas chuvas que ocorrem na região Amazônica, principalmente no período chuvoso (MOLION, 1993). A ZCIT migra sazonalmente em anos considerados normais, para sua posição mais ao sul do hemisfério sul, durante março-abril. Uvo (1989) corrobora ainda que a permanência mais longa ou mais curta da ZCIT em sua posição mais ao sul é o fator mais importante na determinação da qualidade da estação chuvosa da região amazônica.

No segundo padrão, os máximos positivos são encontrados nos meses de abril a julho, o alto índice de precipitação neste período pode estar associado a maior frequência das linhas de instabilidade que ocorrem entre abril e junho, conforme Alcântara et al. (2011), para a região amazônica. As linhas de estabilidades são um sistema precipitante de mesoescala que podem provocar e distribuir as chuvas na região correspondendo a

45% da precipitação no leste paraense (COHEN et al., 1989). O dipolo de precipitação norte-sul pode estar associado a ocorrência de linhas de Instabilidade do tipo SL1 e SL2 que percorrem o continente acima de 170 km do litoral paraense, induzidos pelos sistemas de brisa marítima e locais (MOLION, 1987; COHEN; SILVA DIAS; NOBRE, 1995; MATOS; COHEN, 2016).

As observações derivadas de satélite como o CMORPH, apresentam melhor desempenho para zonas de baixa e média elevação (ZAMBRANO-BIGIARINI et al., 2017), caso típico da região costeira da Amazônia, que se caracteriza como uma topografia plana sem grandes elevações (SOUZA FILHO et al., 2005). Estudos de Tian e Peters-Lidard (2010) corroboram para que os dados de sensoriamento remoto incluído a técnica do CMORPH apresenta mais confiabilidade em áreas com fortes precipitações convectivas e superfícies planas, como os oceanos tropicais e a América do Sul. Neste contexto, a região Amazônica apresenta características favoráveis para a aplicação destes dados pois tem uma elevada atividade convectiva e superfície sem grandes elevações (ADAMS et al., 2009). Assim justifica-se a importância desta pesquisa a partir da espacialização da precipitação pelo produto CMORPH em alta resolução para a região costeira da Amazônia, com aplicabilidade para outras regiões costeiras com características topográficas similares.

2.5 Conclusão

A variação mensal dos dados, apresentou de forma satisfatória e acurada a precipitação na região amazônica durante os meses de janeiro a junho como semestre mais chuvoso e os meses julho a dezembro o semestre menos chuvoso. Na linha de costa a variação de maior acumulado de precipitação vai até o mês de maio. Quando a sazonalidade, verificou-se que o período chuvoso – início das chuvas e meses mais chuvosos – apresentam os maiores acumulados e os menores no período menos chuvoso – meses de transição e início do período menos seco e meses mais secos. Na linha costeira os meses mais chuvosos – março a maio – o quantitativo de chuva é menor comparado ao interior do continente e oceano. Análise anual com os estudos de casos a variabilidade elucidou que os extremos tendem a ser mais extremos, neste caso pode-se verificar que na espacialização dos anos de ENOS a porção territorial continental aumentou para mais ou menos chuva em conformidade da atuação do fenômeno.

O primeiro padrão principal mostrou a sazonalidade da precipitação, nos meses de – março - com maior e menor – outubro e novembro- índice pluviométrico, sendo

influenciado principalmente por sistemas precipitantes de grande escala. A distribuição espacial evidencia a dinâmica de mesoescala com máximos sob o oceano e continente, com pouca variabilidade de chuva sobre a linha de costa, pois esta é uma área de confluência. O segundo padrão mostrou uma contribuição de sistemas de mesoescala e escala local com a interação do uso e cobertura do solo, modulando seus pesos e correlações. Em geral verifica-se que os padrões de precipitação local sofrem influência de diversos sistemas precipitantes que contribuem para o quantitativo da precipitação local. Ademais, é válido salientar que as usos e mudanças de cobertura da superfície interferem principalmente na precipitação local, verificando a grande acurácia dos dados de alta resolução do Cmorph para estudos locais.

É importante avaliar o desempenho do dado CMORPH para a região analisada, pois segundo alguns pesquisadores o dado limita-se ao capturar certos tipos de eventos de precipitação, possuindo vieses importantes e apresentam falsa detecção de precipitação. No entanto, este estudo subsidia a aplicação de dados de sensoriamento remoto em escala refinada para a região costeira da Amazônia e para outros lugares onde há poucas estações meteorológicas e dados escassos e incompletos de precipitação, permitido com eficiência e acurácia a representação local, corroborando com a entrada de dados para modelos climáticos e hidrológicos mais confiáveis, baseados na distribuição espaço temporal e não apenas em interpolações pontuais. Para o poder público a apropriação deste conhecimento é de grande importância para o planejamento territorial e distribuição de políticas públicas, a fim de gerenciar de forma eficiente os problemas decorrentes de extremos climáticos e vulnerabilidade socioambiental.

Referências

ABERA, W.; BROCCA, L.; RIGON, R. Comparative evaluation of different satellite rainfall estimation products and bias correction in the Upper Blue Nile (UBN) basin. **Atmospheric research**, v. 178, p. 471-483, 2016.

ADAMS, D. K.; DE SOUZA, E. P.; COSTA, A. A. Moist convection in Amazonia: implications for numerical modelling. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 24, n. 2, p. 168-178, 2009.

ALCÂNTARA, C. R. *et al.* Verification of the role of the low level jets in Amazon squall lines. **Atmospheric Research**, v. 100, n. 1, p. 36-44, 2011.

AMANAJÁS, J.C.; BRAGA, C. C. Padrões espaço-temporais pluviométricos na Amazônia Oriental usando análise multivariada. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 27, n. 4, p. 423-434, 2012.

- ANDRADE, M. P. *et al.* Effects of a La Niña event on hydrological patterns and copepod community structure in a shallow tropical estuary (Taperaçu, Northern Brazil). **Journal of Marine Systems**, v. 164, p. 128-143, 2016.
- BECKER, B. K. Revisão das políticas de ocupação da Amazônia: é possível identificar modelos para projetar cenários? **Parcerias Estratégicas**, v. 6, n. 12, p. 135-159, 2010.
- BEHRANGI, A. *et al.* Hydrologic evaluation of satellite precipitation products over a mid-size basin. **Journal of Hydrology**, v. 397, n. 3-4, p. 225-237, 2011.
- BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Censo demográfico**. Brasília,DF, 2010. Disponível em: <http://www.cidades.ibge.gov.br/>. Acesso em: 20 de março. 2018
- BRASIL. Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). **Estação meteorológica**. Brasília,DF, 2010. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/>. Acesso em: 18 junho. 2018
- CHEN, S.; ZHA, X. Effects of the ENSO on rainfall erosivity in the Fujian Province of southeast China. **Science of the Total Environment**, v. 621, p. 1378-1388, 2018.
- COHEN, J. C. P.; SILVA DIAS, M.A. F.; NOBRE, C. A. Climatological aspects of the instability lines of the Amazon. **Climanalysis**. v. 4, 34-39, 1989.
- COHEN, J.C. P.; SILVA DIAS, M. A F. NOBRE C.A. Environmental conditions associated with Amazonian squid lines: a case study. **Monthly Weather Review**, v. 123, n. 11, p. 3163-3174, 1995.
- COHEN, J. C. P. *et al.* Radar-observed spatial and temporal rainfall variability near the Tapajós-Amazon confluence. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 29, n. SPE, p. 23-30, 2014.
- CRACKNELL, A. P. Remote sensing techniques in estuaries and coastal zones an update. **International Journal of Remote Sensing**, v. 20, n. 3, p. 485-496, 1999.
- FISCH, G.; MARENGO, J. A.; NOBRE, C. A. Uma revisão geral sobre o clima da Amazônia. **Acta Amazonica**, v. 28, n. 2, p. 101-101, 1998.
- FITZJARRALD, D. R. *et al.* Spatial and temporal rainfall variability near the Amazon-Tapajós confluence. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, v. 113, n. G1, 2008.
- GERMANO, M. F. *et al.* Analysis of the breeze circulations in Eastern Amazon: an observational study. **Atmospheric Science Letters**, v.18, n.2, p.676-75, 2017
- GEYER, W. R. *et al.* Physical oceanography of the Amazon shelf. **Continental Shelf Research**, v. 16, n. 5-6, p. 575-616, 1996.
- GRIMM, A. M; TEDESCHI, R. G. Episódios EL NIÑO e LA NIÑA e a frequência de eventos extremos de precipitação no Brasil: análise no litoral da região sul. *In: XV Congresso Brasileiro de Meteorologia*, Florianópolis, SC. 2006.
- GRIMM, A. M. Interannual climate variability in South America: impacts on seasonal precipitation, extreme events, and possible effects of climate change. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v. 25, n. 4, p. 537-554, 2011.

- HAILE, A. T.; YAN, F., HABIB, E. Accuracy of the CMORPH satellite-rainfall product over Lake Tana Basin in Eastern Africa. **Atmospheric Research**, v. 163, p. 177-187, 2015.
- HURRELL, J. W. *et al.* The North Atlantic Oscillation: climatic significance and environmental impact. *In: AGU FALL MEETING Abstracts[...]*. 2008. v.134, p. 1244.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo demográfico**. Brasília,DF, 2010. Disponível em: <http://www.cidades.ibge.gov.br/>. Acesso em: 20 março. 2018.
- JOYCE, R. J. *et al.* CMORPH: A method that produces global precipitation estimates from passive microwave and infrared data at high spatial and temporal resolution. **Journal of hydrometeorology**, v. 5, n. 3, p. 487-503, 2004.
- KENDALL, M. G. **Rank correlation measures**. London: Charles Griffin, 1975. 220p.
- KJERFVE, B.; LACERDA, L.D. Mangroves of Brazil. *In: LACERDA, L.D. (ed.). WORKSHOP ON CONSERVATION AND SUSTAINABLE UTILIZATION OF MANGROVE FORESTS IN LATIN AMERICA AND AFRICA REGIONS, 1993, [S.l.]. Proceedings[...]. [S.l.]. International Society for Mangrove Ecosystems, 1993. v. 2, p. 245-272.*
- KOUSKY, V. E. Diurnal rainfall variation in northeast Brazil. **Monthly Weather Review**, v. 108, n. 4, p. 488-498, 1980.
- LO CONTI, F. *et al.* Evaluation and comparison of satellite precipitation estimates with reference to a local area in the Mediterranean Sea. **Atmospheric Research**, v. 138, p. 189-204, 2014.
- MALTHUS, T.J.; MUMBY. P. J. Remote sensing of the coastal zone: an overview and priorities for future research. **International Journal of Remote Sensing**, v.24, n.13, p. 2805-2815, 2003.
- MANN, H. B. Econometrica. **The Econometric Society**, v. 13, n. 3, p. 245-259, 1945.
- MARENGO, J. A. *et al.* Onset and end of the rainy season in the Brazilian Amazon Basin. **Journal of Climate**, v. 14, n. 5, p. 833-852, 2001.
- MARENGO, J. A. *et al.* The drought of 2010 in the context of historical droughts in the Amazon region. **Geophysical Research Letters**, v. 38, n. 12, 2011.
- MATOS, A. P.; COHEN, J. C. P. Circulação de brisa e a banda de precipitação na margem leste da baía de Marajó. **Ciência e Natura**, v. 38, p. 21-27, 2016.
- MOLION, L. C. B. Amazon rainfall and its variability. *In: BONELL, M.; HUFSCHEMIDT, M. M.; GLADWELL, J. S. (eds.). Hydrology and water management in the humid tropics*. Cambridge University Press, Cambridge, UK. 1993. (International Hydrology Series).
- MOLION, L. C. B.; BERNARDO, S. O. Dinâmica das chuvas no Nordeste Brasileiro. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA,11., Anais[...]*.Maceio-AL. 2000. 1 CD-ROM.
- 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. de *et al.* Variação espacial e temporal da precipitação no estado do Pará. **Acta Amazonica**, v. 35, n. 2, p. 207-214, 2005.
- MORTLOCK, T.R.; GOODWIN, I. D. Impacts of enhanced central Pacific ENSO on wave climate and headland-bay beach morphology. **Continental Shelf Research**, v. 120, p. 14-25, 2016.
- NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION(NOAA). **Southern Oscillation Index**. Disponível em: <https://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/enso/indicators/soi/>. Acesso em 29/02/2017.
- NOBRE, C. A. *et al.* Characteristics of Amazonian climate: main features. *In*: KELLER, M.; BUSTAMANTE, M.; GASH, J.; DIAS, P. S. (ed). **Amazonia and global change**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2009. p. 149-162. (Geophys. Mon. Ser, v. 186).
- PEREIRA, L. C. C. *et al.* Morphological and sedimentological changes in a macrotidal sand beach in the Amazon littoral (Vila dos Pescadores, Pará, Brazil). **Journal of Coastal Research**, p. 113-117, 2009.
- PEREIRA, L. C. C. *et al.* What happens on an equatorial beach on the Amazon coast when La Niña occurs during the rainy season? **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 135, p. 116-127, 2013.
- PEREIRA, L. C. C. *et al.* Managing physical and anthropogenic hazards on macrotidal Amazon beaches. **Ocean e Coastal Management**, v. 96, p. 149-162, 2014.
- PEREIRA, L. C. C. *et al.* Influence of a drought event on hydrological characteristics of a small estuary on the Amazon mangrove coast. **Estuaries and Coasts**, v. 41, n. 3, p. 676-689, 2017.
- REBOITA, M. S. *et al.* Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 2, p. 185-204, 2010.
- RINGARD, J. *et al.* Temporal and spatial assessment of four satellite rainfall estimates over French Guiana and North Brazil. **Remote Sensing**, v. 7, n. 12, p. 16441-16459, 2015.
- RODRIGUEZ, J.J.; WINDEVOXHEL, N. J. **Análisis regional de la situación de la zona marina costera centroamericana**. Washington. D.C.: Banco Inter-Americano de Desarrollo BID, 1998. No ENV – 121.
- ROGELIS, M. C.; WERNER, M. G. F. Spatial interpolation for real-time rainfall field estimation in areas with complex topography. **Journal of Hydrometeorology**, v. 14, n. 1, p. 85-104, 2013.
- SANTOS, M. R. S. *et al.* Análise da distribuição espaço-temporal da chuva, na mesorregião metropolitana de Belém-Para: contribuições da técnica de sensoriamento remoto. **Caminhos de Geografia**, v. 18, n. 62, p. 49-58, 2017.
- SANTOS, M. R. Silva *et al.* Padrões de precipitação mensal na mesorregião metropolitana de Belém: uso do CMORPH e componentes principais. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 9, n. 07, p. 2301-2311, 2016.
- SCHERER, M.; SANCHES, M.; NEGREIROS, D. H. "Management of coastal zones and public policies in Brazil: a diagnosis" *In*: BARRAGÁN MUÑOZ, J.M. (coord.). **Integrated coastal management and public policy in Ibero-America: a diagnosis**. Need for Change. Cádiz: Red IBERMAR (CYTED), 2010. p. 292-384.

- SODRÉ, G.R.C.; RODRIGUES, L. L. M.; Comparison Between Estimation of Precipitation Observed by the CMORPH Technique and INMET Meteorological Stations in Different Regions of Brazil. **Brazilian Journal of Physical Geography**, v. 6, n. 2, p. 301-307, 2013.
- SOUZA FILHO, P *et al.* Amazon Coastal Zone: the regional scenario and S & T indicators. *In*: SOUZA FILHO, P. W. M; CUNHA, E.R. S. P.; SALES, M. E. C.; SOUZA L. F. M. O.; COSTA, F. R. (eds.). **Bibliography of the Amazon Coastal Zone: Brazil**. Belém: MPEG; UFPA; PETROBRÁS, 2005. p. 9-20.
- SUN, X. *et al.* A global analysis of the asymmetric effect of ENSO on extreme precipitation. **Journal of Hydrology**, v. 530, p. 51-65, 2015.
- TIAN, Y. *et al.* Multitemporal analysis of TRMM-based satellite precipitation products for land data assimilation applications. **Journal of Hydrometeorology**, v. 8, n. 6, p. 1165-1183, 2007.
- TIAN, Y.; PETERS-LIDARD, C. D. A global map of uncertainties in satellite-based precipitation measurements. **Geophysical Research Letters**, v. 37, n. 24, 2010.
- TOMLINSON, C. J. *et al.* Remote sensing land surface temperature for meteorology and climatology: a review. **Meteorological Applications**, v. 18, n. 3, p. 296-306, 2011.
- TRALLI, D. M. *et al.* Satellite remote sensing of earthquake, volcano, flood, landslide and coastal inundation hazards. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 59, n. 4, p. 185-198, 2005.
- UVO, C. R. B. The Intertropical Convergence Zone (ITCZ) and its relation with the precipitation of the Northern Region of the Northeast of Brazil. [S.l.]: INPE, 1989.
- VERWORN, A.; HABERLANDT, U. Spatial interpolation of hourly rainfall-effect of additional information, variogram inference and storm properties. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 15, n. 2, p. 569-584, 2011.
- WILKS, D. S. **Statistical methods in the atmospheric sciences**. 2. ed. London, Academic Press, 2006. 649p.
- WOLDEMESKEL, F. M.; SIVAKUMAR, B.; SHARMA, A. Merging gauge and satellite rainfall with specification of associated uncertainty across Australia. **Journal of Hydrology**, v. 499, p. 167-176. 2013.
- ZAMBRANO-BIGIARINI, M. *et al.* Temporal and spatial evaluation of satellite-based rainfall estimates across the complex topographical and climatic gradients of Chile. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 21, n. 2, p. 1295, 2017.
- ZEWELDI, D. A.; GEBREMICHAEL, M. Evaluation of CMORPH precipitation products at fine space–time scales. **Journal of Hydrometeorology**, v. 10, n.1, p. 300-307, 2009.

CAPÍTULO 3 DISTRIBUIÇÃO ESPAÇO TEMPORAL DAS VARIÁVEIS FÍSICAS E HIDROLÓGICAS NA REGIÃO COSTEIRA DA AMAZÔNIA DURANTE EXTREMOS DE CLIMA⁶

Resumo: A zona costeira da Amazônia é caracterizada por possuir dezenas de estuários e um elevado índice pluviométrico durante o primeiro semestre do ano. O objetivo desta pesquisa é analisar a distribuição das variáveis físicas e hidrológicas, durante períodos típicos e anômalos, quanto aos níveis de precipitação. Parte-se do pressuposto que as variáveis físicas modulam a hidrologia local, com maior interferência durante anos de ocorrência de extremos negativos de chuva. A região de estudo foram dois estuários (Caeté e Taperaçu) e litoral (praia de Ajuruteua), ambos situados na costa leste da Amazônia, nordeste do estado do Pará. Os dados pluviométricos foram obtidos de duas fontes distintas para fins de comparação: (i) estação meteorológica superficial e (ii) sensoriamento remoto (CMORPH). Os anos de anomalia climática foram classificados de acordo com os dados do Índice de Oscilação Sul (IOS) e o Modo Meridional do Atlântico (MMA). Os dados de maré e hidrológicos de salinidade, clorofila-a e turbidez foram coletados durante campanhas em três setores (superior, médio e inferior) para cada estuário, e um setor único para praia de Ajuruteua. Os resultados mostraram que os acumulados anuais estimados pelo CMORPH superestimam em 3,7% às chuvas quando comparados aos registros da estação meteorológica de superfície. Os dados de sensoriamento remoto são mais superestimados durante anos Típicos e de La Niña (ex., 2000, 2009 e 2011 e 2017) e menores em anos considerados Seco⁷ ou El Niño (ex., 1998, 2005, 2010, 2013 e 2015). Os resultados apresentaram relação inversa entre a precipitação e a salinidade para as três áreas de estudo. As águas foram mais salinas, com menores concentrações de clorofila e menos turvas no final do segundo semestre do ano, maiormente durante os anos Seco (2013) e El Niño (2015 e 2016). Os menores valores de salinidade foram durante o primeiro semestre, também se registrou águas mais concentradas em clorofila-a e mais turvas durante anos típicos e evento La Niña. Tais resultados podem ser replicados para conhecer a influência das chuvas durante anos

⁶ Projeto submetido a chamada do CNPq N° 08/2019 (Doutorado Sanduíche) para Universidade Politécnic da Catalunya – Espanha.

⁷ A terminologia Seco está associada ao evento climático com maior contribuição do oceano atlântico na variabilidade da chuva.

típicos e atípicos de clima em outras regiões costeiras e estuarinas servindo como base para o gerenciamento de políticas públicas locais.

Palavras chave: Chuva, Salinidade, Clorofila-a, Estuário, Amazônia

Abstract: The coastal zone of the Amazon is characterized by having dozens of estuaries and a high rainfall index during the first half of the year. The objective of this research is to verify the distribution of physical and hydrological variables, during typical and anomalous periods, regarding the levels of precipitation. It is assumed that the physical variables modulate the local hydrology, with greater interference during years of occurrence of negative rainfall extremes. The study region were two estuaries (Caeté and Taperaçu) and coast (Ajuruteua beach), both located on the east coast of the Amazon, northeast of the state of Pará. The pluviometric data were obtained from two different sources for comparison purposes: (i) surface weather station and (ii) remote sensing (CMORPH). The years of climatic anomaly were classified according to data from the South Oscillation Index (IOS), Sea Surface Temperature (TSM) and current scientific literature. Tidal and hydrological data on salinity, chlorophyll-a and turbidity were collected during campaigns in three sectors (upper, middle and lower) for each estuary, and a single sector for Ajuruteua beach. The results showed that the annual accumulated values estimated by CMORPH overestimate the rainfall by 3.7% when compared to the records of the surface weather station. Remote sensing data is overestimated during Typical and La Niña years (eg, 2000, 2009 and 2011 and 2017) and lowest in years considered Seco or El Niño (eg, 1998, 2005, 2010, 2013 and 2015) . The results showed an inverse relationship between precipitation and salinity for the three study areas. The waters were more saline, with lower concentrations of chlorophyll and less turbid at the end of the second half of the year, mainly during the years Seco (2013) and El Niño (2015 and 2016). The lowest salinity values were observed during the first semester, also more concentrated water in chlorophyll-a and more turbid during typical years and the La Niña event. Such results can be replicated to understand the influence of rain during typical and atypical years of climate in other coastal and estuarine regions, serving as a basis for the management of local public policies.

Keywords: Rain, Salinity, Chlorophyll-a, Estuary, Amazon

3.1 Introdução

As áreas costeiras são regiões de interação entre o oceano e a terra, o que lhes confere grande relevância aos processos físicos, químicos e biológicos que decorrem dos sistemas oceânico, atmosférico e terrestre (RODRÍGUEZ; WINDEVOXHEL, 1998, GEORGIU; FITZGERALD; STONE, 2005; GOSCHEN; SCHUMANN, 2011). Essas regiões são altamente produtivas pois apresentam um constante fluxo das marés e do aporte de nutrientes provenientes da drenagem fluvial terrestre, permitindo a formação de ambientes como os estuários e praias (RODRIGUES; CUTRIM, 2010). Os estuários são ambientes costeiros com grande importância ambiental, econômica e social, constituindo-se como um ecossistema de transição entre o rio e o mar, permitindo que a transposição de grande parte da matéria orgânica dos continentes flua em direção aos oceanos (DUARTE; VIEIRA, 1997; SCHETTINI, 2002).

Ecologicamente, os estuários apresentam uma alta produtividade biológica, o que possibilita o abrigo e o crescimento de diversas espécies animais e vegetais dos ambientes lacustres e marinhos (KAISER; LAMY; HEBBELN, 2005), tornando-se áreas de interesse para o setor pesqueiro e para a sustentação de populações tradicionais (PAZ; FRÉDOU; FRÉDOU, 2011; BATISTA; SIMONIAN, 2013). As zonas estuarinas também são áreas privilegiadas para a fixação das sociedades, uma vez que são espaços abrigados, com favorável localização de portos, desenvolvimento de atividades turísticas e de lazer, bem como imobiliária, comercial, industrial, entre outras (DUARTE; VIEIRA 1997). Na região estuarina do nordeste paraense, nota-se grande importância para o equilíbrio ambiental e social, o que provocou ao governo brasileiro a demarcação de 12 unidades de conservação, classificadas com reservas extrativistas marinhas nesses locais (ICMBIO, 2005).

Nos estuários, as marés são relevantes forçante física pois controlam em uma escala curta de tempo (de 6 para 12h) a oscilação de variáveis hidrológicas em áreas costeira, principalmente em regiões onde há o predomínio do regime das macromarés (> 4 m) (BARBOSA et al., 2007; GRATIOT et al., 2008; MONTEIRO; PEREIRA; OLIVEIRA, 2009; PEREIRA et al., 2009). A precipitação pluviométrica é outra forçante física, que controla diretamente a oscilação da vazão fluvial e contribui com o aporte de sedimentos terrestre para o mar, favorecendo essas regiões (LARA; DITTMAR, 1999; LIMBERGER; SILVA, 2012). Ambas variáveis interferem sazonalmente nas variáveis hidrológicas como salinidade, clorofila-a e turbidez, bem como nas comunidades

planctônicas, por exemplo (DELCROIX et al., 1996; SUMMER; BELAINEH, 2005; CHILDERS et al., 2006; PRIMO et al., 2009; GOES et al., 2014).

Pesquisas mostram o comportamento dos ambientes estuarinos frente aos fenômenos climáticos (El Niño, La Niña e Seco), especialmente nos efeitos que os eventos atípicos do clima provocam sobre as oscilações hidrológicas e hidrodinâmicas nesse ecossistema (WILKERSON et al., 2002; ANDRADE et al., 2016; PEREIRA et al. 2017). Os resultados do fenômeno ENOS nas fases de El Niño e La Niña são bastantes investigados em regiões costeiras, uma vez que as anomalias de chuva podem alterar os processos hidrológicos e hidrodinâmicos (BRUGNOLI-OLIVERA; MORALES-RAMÍREZ, 2008; ANDRADE et al., 2016). Evidencia-se que há modificações nas variáveis físicas, químicas e hidrológicas de estuários durante os episódios de ENOS, com redução significativa da diversidade e densidade de biomassa e fitoplâncton, durante a fase do El Niño (decréscimo no quantitativo de chuva) e abundância durante a fase da La Niña (acréscimo no quantitativo de chuva) (SATHICQ; BAUER; GÓMEZ 2015).

Tendo em vista os anos típicos e atípico de clima e buscando compreender as interfaces desses eventos nos estudos hidrológicos, motiva-se a aplicação de dados e ferramentas de detecção remota, com o intuito de diminuir as diferenças dos dados espaço-temporal e para preencher lacunas sobre a variabilidade de variáveis hidrológicas, hidrodinâmicas e da qualidade da água em regiões costeiras (GRATIOT et al., 2008; GHOLIZADEH; MELESSE; REDDI, 2016; GOUVEIA et al., 2019). Os dados de detecção remota são instrumentos eficazes em pesquisas de mapeamento, modelagem e previsão de variáveis hidrológicas como: salinidade, turbidez e outros fatores hidrodinâmicos e ecológicos em sistemas estuarinos (DOGLIOTTI et al., 2015; NOERNBERG et al., 2006; WANG et al., 2020).

Os produtos de sensoriamento remoto são comumente usados em pesquisas na região costeira da Amazônia, utilizando dados referentes a cobertura vegetal, especificamente sobre o ecossistema de manguezal (BRONDIZIO et al., 1996; SOUZA FILHO; PARADELLA, 2002; SOUZA FILHO; MARTINS; COSTA, 2006), sendo escassos os trabalhos que utilizam os produtos de detecção remota para a variabilidade e distribuição de variáveis hidrológicas em ambientes costeiros na região (VAZ; DIAS, 2008; BARBOSA et al., 2010; DÍEZ-MINGUITO et al., 2013; RODRIGUES; SOUZA-FILHO, 2011; MELACK; HESS, 2010).

Neste contexto, a presente pesquisa busca contribuir para estudos interdisciplinares sobre o tema, evidenciando a utilização de dados de sensoriamento remoto com variáveis

hidrológicas, bem como compreender como esses complexos ambientes se comportam (suas variáveis hidrológicas) mediante a uma variação climática. Este estudo também contribui para a literatura local, visando a discussão e reprodução em outras regiões semelhantes. Espera-se que em anos de ocorrência dos fenômenos El Niño e Seco, e consequentemente com a redução nos níveis de precipitação, as variáveis hidrológicas como turbidez e clorofila-a apresentem redução, e a salinidade um incremento positivo. Por outro lado, em anos de La Niña, aguarda-se que os níveis de clorofila-a e turbidez aumentem e a salinidade diminua.

O presente estudo avaliou períodos típicos e anômalos de clima na área de estudo. Nesse contexto, o estudo inclui três questões principais: (a) a inclusão de dados de precipitação provenientes de sensoriamento remoto em escala refinada (Precipitação/CMORPH) corrobora com os dados obtidos pela estação meteorológica e são apropriados para serem usados em análises hidrológicas? b) a distribuição temporal das variáveis físicas (precipitação e maré) e das hidrológicas (salinidade, clorofila-a e turbidez) estão relacionadas com os setores de coleta e quais os fatores causam a sua variabilidade? c) A distribuição espaço-temporais das variáveis físicas e hidrológicas e a mesma em estuários distintos (semiabertos – Taperaçu e abertos – Caeté e o que leva a sua distribuição em cada setor?

O principal objetivo deste estudo foi analisar a distribuição espaço-temporal da precipitação e das variáveis hidrológicas em anos típicos e anômalos de clima e os efeitos dessas condições em duas regiões estuarinas e de praia no nordeste paraense. Para isto, a dinâmica espacial e temporal de fatores foram estudadas durante um período de condições normais de clima, El Niño, La Niña e Seco. Assim espera-se que esta pesquisa possa ser aplicada para outras regiões costeiras do Brasil ou do mundo, que tenham baixa qualidade/quantidade de dados de chuva, encorajando estudos interdisciplinares que relacionam dados climáticos e hidrológicos em diferentes escalas.

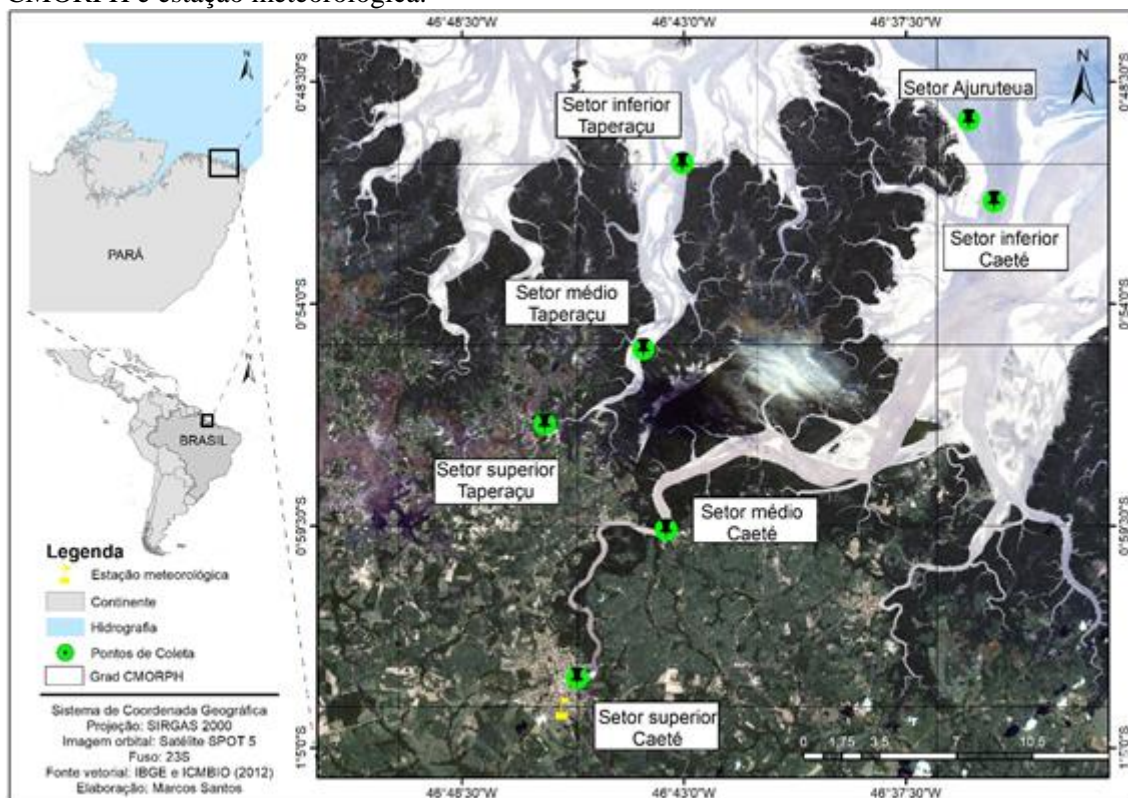
3.2 Material e métodos

3.2.1 Caracterização da área de estudo

A área em estudo está localizada no município de Bragança, a cerca de 150 km a sudeste da foz do rio Amazonas, e abrange dois estuários (Taperaçu e do Rio Caeté) e a praia de Ajuruteua, no nordeste do estado do Pará (Figura 14). O clima local é classificado como úmido equatorial, com uma estação chuvosa, entre janeiro e junho, e outra menos chuvosa entre agosto e dezembro (MARTORANO et al., 1993). Durante a estação

chuvosa, o acumulado mensal geralmente excede 400 mm (março), provocados pela atuação do sistema precipitante de escala global (Zona de Convergência Intertropical – ZCIT) (AMANAJÁS; BRAGA, 2012). Neste período, os ventos sopram com uma intensidade média de até $3,0 \text{ m s}^{-1}$ e as temperaturas médias variam de 26°C a 27°C .

Figura 14- Área de estudo: localização dos estuários do Taperaçu e Rio Caeté e da Praia de Ajuruteua no nordeste paraense, com ênfase na posição das estações de coleta, grad do CMORPH e estação meteorológica.



Fonte: Do autor.

Na estação menos chuvosa, os acumulados mensais atingem o mínimo de 30 mm (novembro), oriundos da interação de sistemas precipitantes locais e sistemas de brisa (COHEN; SILVA DIAS; NOBRE, 1995). No segundo semestre, os ventos sopram mais fortes, atingindo velocidades médias acima de $4,0 \text{ m s}^{-1}$, e as temperaturas médias ficam entre 28°C a 30°C (MARTORANO et al., 1993; INMET, 2019). A vegetação é majoritariamente de ecossistema de manguezal englobando uma área de aproximadamente 110 km^2 (SOUZA-FILHO, 2005). Quando a interferência antrópica, no estuário do Taperaçu esta é mínima, sendo mais significativa no estuário do Caeté, pois uma estação de coleta fica próxima ao centro urbano (MONTEIRO; JIMÉNEZ; PEREIRA, 2016). A área de estudo também está inserida em uma Unidade de Conservação Federal (UC), classificada como Reserva Extrativista Marinha (RESEX)

Caeté-Taperaçu, onde os moradores locais usam os recursos naturais para sua sobrevivência de forma sustentável.

O estuário do Taperaçu tem uma superfície de 21 km² e uma bacia hidrográfica de aproximadamente 40 km², com profundidade média de 4 m. A nascente do antigo rio foi assoreada e por isto, a entrada de água doce ou menos salina advém respectivamente das áreas úmidas adjacentes através dos canais de marés e do estuário de Caeté por meio do furo do Taici (ARAÚJO; ASP, 2013; PEREIRA et al., 2017). As marés locais são semidiurnas e podem variar de 5 a 6m próximo à entrada do estuário durante as marés de sizígia e alcançam entre 3 e 4m durante marés de quadratura. As correntes de maré são típicas de estuários de águas rasas, podendo atingir valores acima de 1,5 m s⁻¹ (ASP et al., 2012).

O estuário do Caeté consiste em vários canais que se ramificam, seu canal principal tem forma sinuosa com comprimento superior a 40 km e uma largura de 150m no limite mais ao sul e 4.600 m na foz (GUERRA; CUNHA, 1998). Pode ser classificado como estuário bem misturado, permanentemente aberto, turvo e raso, com profundidade máxima de cerca de 10 m (BARLETTA-BERGAN et al., 2002). O estuário do rio Caeté é dominado por águas de marés semidiurnas que variam entre 4 e 6 m durante os períodos de marés de Sizígia (DHN, 2015). A vazão do rio pode alcançar 82,5 m³/s, durante a estação chuvosa, e uma descarga mínima de 3,0 m³/s na da estação seca, os níveis de água no estuário podem variar entre 4,2m e 4,9m. A salinidade apresenta valores entre 0 a 40 NTU com concentrações de clorofila entre 4 e 18 mg.m³ (MONTEIRO; JIMÉNEZ; PEREIRA 2016).

A praia de Ajuruteua tem aproximadamente 2,5 km de extensão delimitada pelo Oceano Atlântico e dois canais de marés e "Chavascal" e "Barca". É uma praia de macromaré arenosa com uma largura entre 200 a 400 m durante as marés baixas de Sizígia (PEREIRA et al., 2007). As marés locais são semidiurnas e assimétricas. Marés vazantes são mais longas (6,5 e 7,5 h) do que as marés de inundação e as variações das marés vivas estão entre 5,0 e 5,5 m. Os padrões de circulação na área são dominados por marés correntes que fluem para o noroeste durante a vazante e para o sudeste durante a enchente com alturas de onda significativas (H_s) que podem exceder 1 m (MONTEIRO; PEREIRA; OLIVEIRA, 2009) e, em geral, ondas de derramamento quebram em dois ou mais bancos de areia (BARBOSA et al., 2007).

3.2.2 Metodologia

Esta pesquisa fundamenta-se em dados de variáveis físicas (precipitação e maré) e hidrológicas (salinidade, clorofila-a e turbidez) obtidos durante diferentes períodos de clima, compreendendo períodos de El Niño, La Niña, Seco e Típico. Optou-se por essas variáveis pois as mesmas sofrem influência direta dos eventos climáticos.

3.2.2.1 Trabalho de Campo

As coletas foram realizadas durante o período de cinco anos, entre junho/2013 e maio/2017, com o intuito de abranger distintos eventos climáticos (El Niño, La Niña, Seco e Típico) durante os meses do período chuvoso e menos chuvoso da região.

3.2.2.2 Variáveis hidrológicas

Para análise das variáveis hidrológicas -salinidade, clorofila-a e turbidez, as campanhas foram realizadas com duração de 25 horas, disposta em três setores de coleta na região estuarina do Rio Caeté e Taperaçu (setor superior, setor médio e setor inferior, e um único setor na Praia de Ajuruteua (Quadro 3.1). Os locais de coleta foram determinados, de acordo com o grau de ocupação e níveis de salinidade, e foram analisados em escala temporal e espacial.

Os dados de salinidade e turbidez foram coletados por CTDs fundeados a cada dez minutos, nos pontos de coleta. Para a obtenção da clorofila-a em cada ponto do estuário, nove amostras de água foram coletadas por campanha para análise, as coletas foram feitas a cada três horas, por amostras de água superficiais foram coletadas com o auxílio de garrafas de Niskin, a uma profundidade de aproximadamente 0,5 m e armazenadas em garrafas de polietileno esterilizadas sob refrigeração para imediata análise em laboratório.

3.2.2.3 Trabalho de Laboratório

O trabalho laboratorial consistiu nas análises das variáveis hidrológicas - turbidez e clorofila-a, e variável física - precipitação por meio do tratamento computacional dos dados de sensoriamento remoto. A classificação dos eventos climáticos em El Niño, La Niña, Seco e Típico fundamentou-se nos valores mensais dos Índices Oscilação Sul (IOS)⁸, disponível em: <https://psl.noaa.gov/data/correlation/soi.data> e do Modo

⁸ É uma indicação numérica do desenvolvimento e da intensidade do El Niño Oscilação Sul (ENOS), calculado usando as diferenças médias de pressão ao nível médio do mar entre Tahiti e Darwin (NOAA,2017).

Meridional do Atlântico (MMA)⁹, disponível em: <https://psl.noaa.gov/data/timeseries/monthly/AMM/ammsst.data>, e corroborado por publicações científicas de Andrade et al., (2016) e Pereira et al.; 2013, 2017.

Quadro 1- Condições de coletas em campo

Estuário do Rio Caeté			Estuário do Taperaçu			Praia de Ajuruteua		
Estação	Campanha Mês/Ano	Evento Climático	Estação	Campanha Mês/Ano	Evento Climático	Estação	Campanha Mês/Ano	Evento Climático
Chuvosa	Jun/13	Seco	Chuvosa	Jun/13	Seco	Chuvosa	Jul/13	Seco
Menos Chuvosa	Out/13	Seco	Menos Chuvosa	Set/13	Seco	Menos Chuvosa	Out/13	Seco
Menos Chuvosa	Dez/13	Seco	Menos Chuvosa	Nov/13	Seco	Menos Chuvosa	Dez/13	Seco
Chuvosa	Abr/14	Seco	Chuvosa	Abr/14	Típico	Chuvosa	Abr/14	Típico
Chuvosa	Jun/14	Típico	Chuvosa	Jun/14	Típico	Menos Chuvosa	Set/14	Típico
Menos Chuvosa	Set/14	Típico	Menos Chuvosa	Set/14	Típico	Menos Chuvosa	Dez/14	Típico
Menos Chuvosa	Dez/14	Típico	Menos Chuvosa	Dez/14	Típico	Chuvosa	Mar/15	Típico
Chuvosa	Mar/15	El Niño	Chuvosa	Mar/15	El Niño	Chuvosa	Jun/15	El Niño
Chuvosa	Jun/15	El Niño	Chuvosa	Jun/15	El Niño	Menos Chuvosa	Nov/15	El Niño
Menos Chuvosa	Set/15	El Niño	Menos Chuvosa	Set/15	El Niño	Chuvosa	Jan/16	El Niño
Menos Chuvosa	Dez/15	El Niño	Menos Chuvosa	Dez/15	El Niño	Chuvosa	Jul/16	El Niño
Chuvosa	Abr/16	El Niño	Chuvosa	Abr/16	El Niño	Menos Chuvosa	Set/16	El Niño
Chuvosa	Jul/16	El Niño	Chuvosa	Jun/16	El Niño	Menos Chuvosa	Nov/16	El Niño
Menos Chuvosa	Out/16	La Niña	Menos Chuvosa	Set/16	El Niño	Chuvosa	Abr/17	La Niña
Chuvosa	Mai/17	La Niña	Menos Chuvosa	Nov/16	El Niño			
			Chuvosa	Abr/17	La Niña			

Fonte: Do autor.

⁹ É um índice climático de analogia para temperatura superficial das águas superficiais do oceano Atlântico tropical (CHIANG; VIMONT, 2004).

3.2.2.4 Variável física

Os dados de precipitação foram extraídos do banco da NOAA (ftp.cpc.ncep.noaa.gov/precip/CMORPH_V1.0/CRT/8km-30min/) em escala global, referentes aos dados da técnica CMORPH na resolução espacial de 8Km e temporal de 30 min, durante o período de janeiro de 1998 a março de 2017. Como se trata de dados em escala planetária e de formato binário, os mesmos passaram por técnica de refinamento refinados para a escala local das estações, seguindo os passos: i) extração dos dados globais para dados locais em formato ctl. ii) programação para leitura dos dados em escala mensal, anual e trimestral, iii) visualização dos dados no programa OpenGrads.

Para os acumulados mensais, anuais e a climatologia foram utilizados dados de precipitação em suas respectivas escalas temporais, extraídos da grad do CPC MORPHing technique (CMORPH). Os dados de chuva do sensoriamento remoto comparados com os dados da estação meteorológica de superfície de Bragança, sob administração do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), correspondo aos acumulados anuais e mensais para o período de janeiro de 1998 a março de 2017 para verificar a representatividade e correlação de ambas fontes.

Os dados de maré foram coletados por meio de marégrafos nos respectivos pontos e comparados aos dados do DHN.

3.2.2.5 Variáveis hidrológicas

Em laboratório foram verificados os dados de clorofila-a, onde as amostras de água foram filtradas, utilizando filtros de fibra de vidro por um sistema à vácuo (SOUSA et al., 2016). As concentrações de clorofila-a foram extraídas do filtro com acetona a 90% e determinadas com o auxílio de um espectrofotômetro, de acordo com a metodologia descrita por Strickland e Parsons (1963) e UNESCO (1966). As concentrações de clorofila-a foram determinadas de acordo com a equação seguinte:

$$\text{Clorofila a} = (11,6.D665 - 1,31.D645 - 0,14.D630).v/V$$

Onde:

D= leituras da absorbância nos respectivos comprimentos de onda a que se referem seus índices;

v= volume da solução de acetona 90% (10 mL);

V= volume da amostra filtrada (mL).

3.2.2.6 *Análise estatística*

Para verificar as normalidades dos dados utilizou-se o teste de Shapiro-Wilk (MOTTA, 2006; RODRIGUES, 2014). Os dados normais ou homogêneos foram avaliados usando o teste de Lilliefors (CONOVER, 1971) e BARTLETT (SOKAL; ROHLF, 1969), respectivamente, executados no programa IBM SPSS statistic 22, e os dados não normais ou heterogêneos foram transformados para aproximar uma distribuição normal por meio do $\log(x + 1)$. A homogeneidade dos dados foi então testada para verificar a variação sazonal e diferenças entre as estações de amostragem. Quando os dados eram heterogêneos, aplicou-se aos procedimentos de Mann-Whitney (U) ou Kruskal-Wallis (H). Um nível de significância de $p < 0,05$ foi considerado em todos análises. A análise de Componentes Principais (ACP) foi aplicada para avaliar os padrões espaciais e temporais das variáveis físicas e hidrológicas. Os gráficos foram feitos no programa Grapher 9, representando os valores médios e os desvios padrões de cada variável.

3.3 Resultados

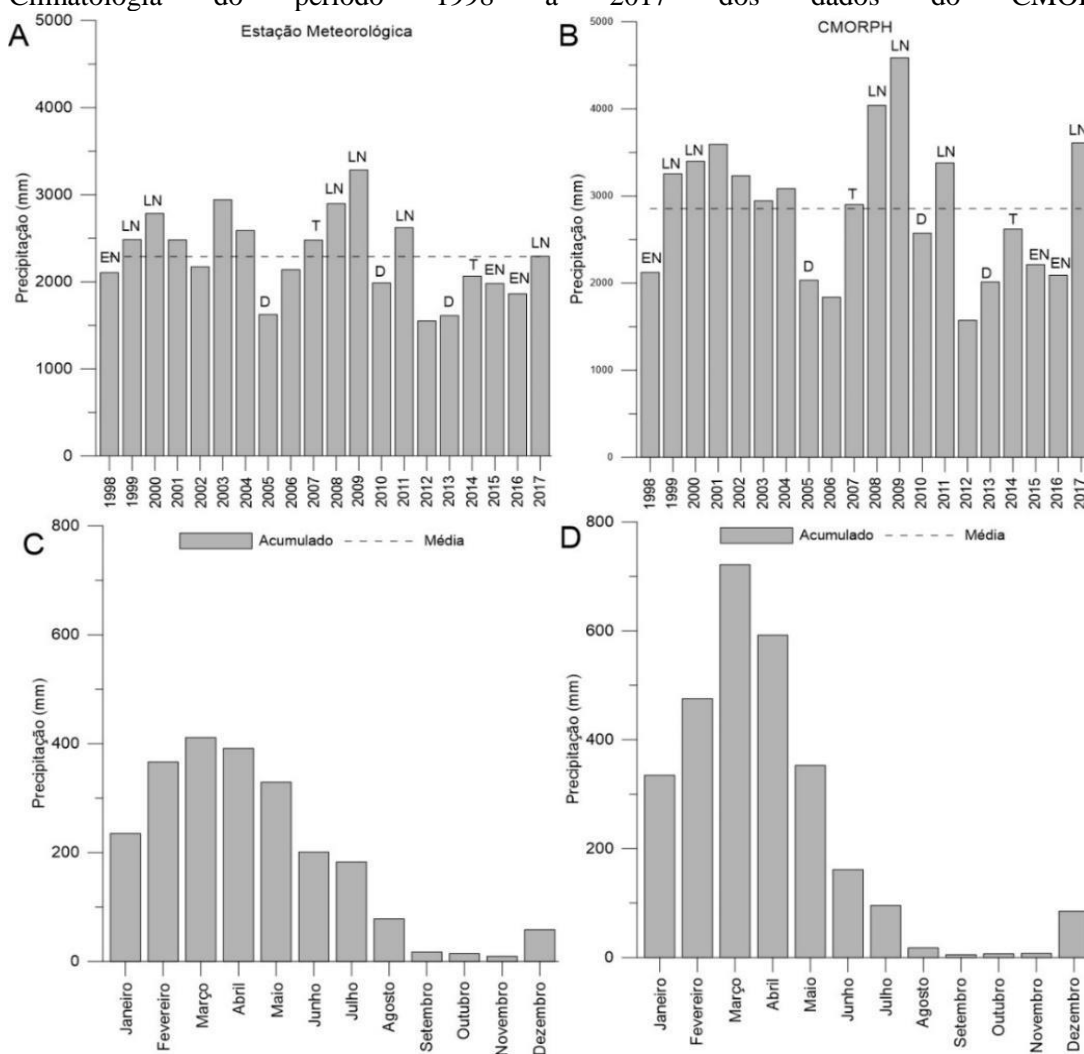
Os resultados mostram que as oscilações interanuais no quantitativo de precipitação podem interferir nas variáveis hidrológicas em estuários e no litoral da costa amazônica. Em primeiro lugar, buscou-se comparar e analisar os dados de precipitação, obtidos por meio da estação meteorológica e de sensoriamento remoto em anos típicos e atípicos de clima, bem como, conhecer a climatologia para os meses de estudo. Depois, analisou-se a distribuição espaço temporal das variáveis a partir dos anos típicos e atípicos de clima para cada estuário e região litorânea.

3.3.1 Precipitação de superfície e sensoriamento remoto

Anualmente os dados do sensoriamento remoto superaram os dados obtidos pela estação (Figura 15A e B), todavia nos anos considerados Seco ou El Niño (ex., 1998, 2005, 2013 e 2015), essa superestimativa apresenta uma diferença de aproximadamente 401 mm, o contrário é observado em anos típicos e La Niña (ex., 1999, 2009 e 2011) quando a diferença alcança 1315 mm. Quando analisada a sazonalidade anual, no primeiro semestre (janeiro a junho) os dados do CMORPH superestimam os dados da estação meteorológica, com diferença do acumulado de 704 mm. No segundo semestre (julho a dezembro) os dados registrados pela estação são superiores aos registrados pelo sensoriamento remoto com assimetria de 143 mm. Os valores mensais foram analisados

por meio da climatologia (Figura 15C e D) onde o sensoriamento remoto superestimou março – mês mais chuvoso, com 310 mm e subestimou novembro – mês menos chuvoso, com 3mm. Os dados do CMORPH responderam de forma satisfatória (com tendência positiva de 3,7%) para o acumulado real da precipitação, elucidado pela estação meteorológica de superfície, apresentou de forma coerente a sazonalidade regional (período chuvoso e menos chuvoso), validando de forma satisfatória o acumulado real da precipitação, onde não há estações pluviométricas.

Figura 15- A. Precipitação total anual entre 1998 2017 da estação meteorológica, destacando os anos de Seco (D), típico (T), El Niño (EN) e La Niña (LN). B. Precipitação total anual entre 1998 e 2017 do CMORPH, destacando os anos Seco (D), típico (T), El Niño (EN) e La Niña (LN). C Climatologia do período 1998 a 2017 dos dados da estação meteorológica e D. Climatologia do período 1998 a 2017 dos dados do CMORPH.



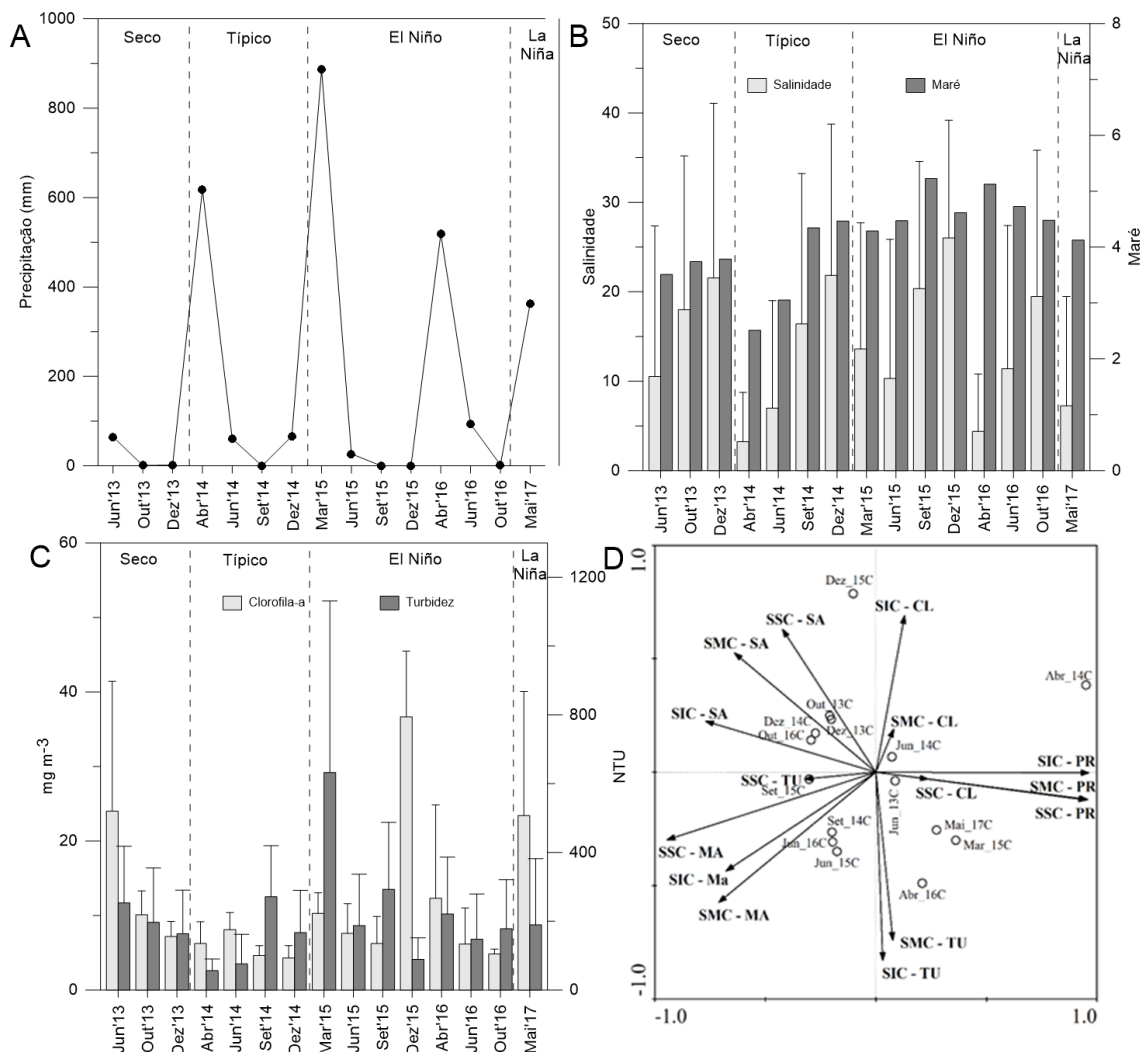
Fonte: Do autor.

3.3.1 Distribuição espaço temporal em anos típicos e atípicos de clima

No estuário do Rio Caeté durante os meses de outubro e dezembro de 2013, e setembro e dezembro de 2015, não houve registro de chuvas, durante ano Seco e de El

Niño, respectivamente. Por outro lado, o maior acumulado de chuva foi de 720 mm registrado em março de 2015, ano de ocorrência do El Niño, este mês correspondeu a 33% da chuva daquele ano (2182 mm) (Figura 16A). Os dados de salinidade apresentaram os menores valores ($3,2 \pm 5,5$) em abril de 2014 ano considerado típico e os maiores (26 ± 13) durante o mês de dezembro de 2015 ano de El Niño. A maré apresentou altura entre 2,5m em abril de 2014 e 5,2m em setembro de 2015. (Figura 16B).

Figura 16- A. Acumulado mensal de precipitação dados do CMORPH; B. Dados mensais médios e desvio padrão da salinidade e maré; C. Dados mensais médios e desvio padrão da clorofila-a e turbidez e D. Análise de componentes principais.



Fonte: Do autor.

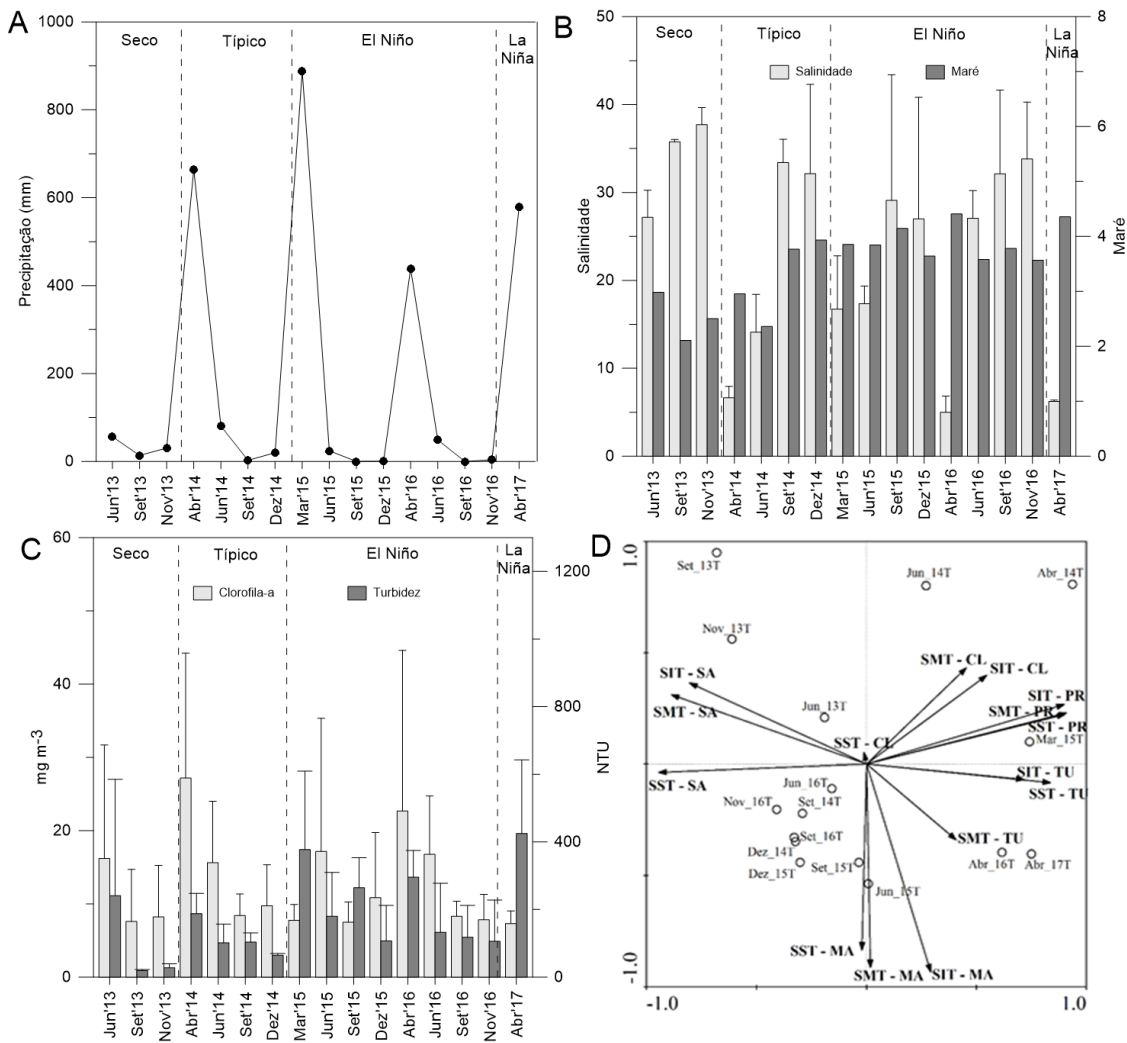
A clorofila-a mostrou menor concentração ($4,2 \pm 16 \text{ mg m}^{-3}$) em dezembro de 2014 e maior ($36,6 \pm 8,8 \text{ mg m}^{-3}$) em dezembro de 2015, sendo que as águas estavam menos turvas em abril de 2014 ($56 \pm 33,7 \text{ UNT}$) (Unidade Nefelométrica de Turbidez) e mais turvas em março de 2015 ($632,4 \pm 498,5 \text{ UNT}$) e para ambas variáveis seus máximos e mínimos foram encontrados em anos de El Niño e típico, respectivamente (Figura 16C).

A variabilidade espaço-temporal das variáveis foi elucidada por 59% da variação total dos dados, mostrando a precipitação com maior correlação positiva ($<0,95$) no ano de típico (Abr_14), estando correlacionada inversamente a salinidade ($>-0,77$) principalmente em ano de El Niño (Dez_15) (Figura 16D).

No estuário do Taperaçu não foram registradas chuvas durante o mês de setembro de 2015 e 2016, ano de ocorrência de El Niño. Por outro lado, o maior registro foi de 887 mm acumulado durante março de 2015, ano de ocorrência do El Niño, este mês correspondeu a 40% da chuva daquele ano (2.242 mm) (Figura 17A). As águas do Taperaçu estavam menos salinas ($4,9 \pm 1,8$) em abril de 2016 ano de El Niño e com maior concentração de sal ($37,7 \pm 1,9$) durante o mês de novembro de 2013 ano seco. A altura de maré alcançou nível mínimo de 2,1m em setembro de 2013 e máximo 4,4m em abril de 2016, anos Seco e El Niño, respectivamente (Figura 17B)

A concentração de clorofila-a estava mais reduzida ($7,5 \pm 2,7 \text{ mg m}^{-3}$) em setembro de 2015, ano de El Niño e maior ($27,1 \pm 17 \text{ mg m}^{-3}$) em abril de 2014, ano típico. As águas ficaram menos turvas em setembro de 2013 ($19 \pm 3,7 \text{ UNT}$) e mais turvas em março de 2015 ($377,3 \pm 231,9 \text{ UNT}$) anos Seco e El Niño, respectivamente, (Figura 17C). A variabilidade espaço-temporal das variáveis foi elucidada por 67% da variação total dos dados, mostrando a precipitação com maior correlação positiva ($>0,90$) no ano de El Niño (Mar_15), estando correlacionada inversamente a salinidade ($>-0,94$) especialmente em ano de ocorrência de seca (Nov_13) (Figura 17D).

Figura 17- A. Acumulado mensal de precipitação dados do CMORPH; B. Dados mensais médios e desvio padrão da salinidade e maré; C. Dados mensais médios e desvio padrão da clorofila-a e turbidez e D. Análise de componentes principais.



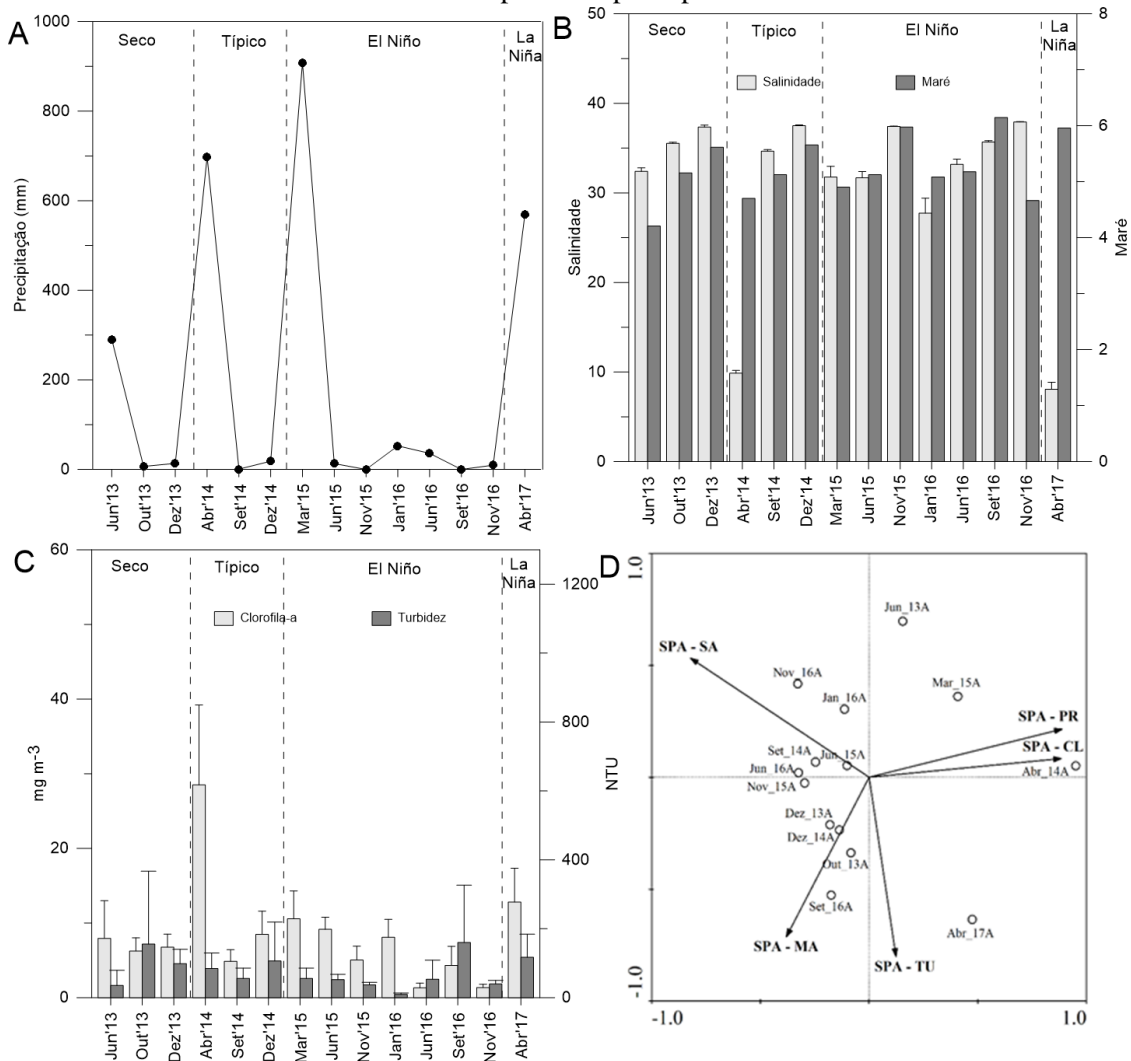
Fonte: Do autor.

Para a Praia de Ajuruteua, durante os meses de novembro de 2015 e setembro 2016 anos de El Niño, não houve registro de chuva, e o maior acumulado da precipitação foi de 908 mm registrado em março de 2015, ano de El Niño, este mês correspondeu a 45% da chuva daquele ano (2000 mm) (Figura 18A). As águas costeiras estavam menos salinas ($8 \pm 0,8$) em abril de 2017 ano de ocorrência da La Niña e mais salgadas ($37,9 \pm 0$) durante o mês de novembro de 2016, ano de El Niño. A maré apresentou altura entre 4,2m junho de 2013, e 6,1m em setembro de 2016 e anos de Seco e El Niño, respectivamente (Figura 18B).

A clorofila-a apresentou menores concentrações ($1,3 \pm 0,6$ mg m⁻³) em junho de 2016 em ano de El Niño e estava mais concentrada ($28,4 \pm 10,7$ mg m⁻³) em abril de 2014, ano típico, sendo que as águas estavam menos turvas em janeiro de 2016 ($9,2 \pm 4,1$ UNT) ano de El Niño e com maior quantidade de material em suspensão em setembro de 2016

(160,1±166,3 UNT) (Figura 18C). A variabilidade espaço-temporal das variáveis foi elucidada por 77% da variação total dos dados, apresentando a precipitação com maior correlação positiva ($<0,88$) no ano de típico (Abr_14), estando correlacionada positivamente com a clorofila-a em (Abr_14) ano de condição climática típica, com correlação inversa a salinidade ($>-0,82$) em novembro de 2016 e a maré ($>-0,38$) em setembro de 2016 ano de El Niño (Figura 18D).

Figura 18- A. Acumulado mensal de precipitação dados do CMORPH; B. Dados mensais médios e desvio padrão da salinidade e maré; C. Dados mensais médios e desvio padrão da clorofila-a e turbidez e D. Análise de componentes principais.



Fonte: Do autor.

3.4. Discussão

A precipitação é a variável climatológica mais investigada na região amazônica e seu quantitativo está diretamente relacionado à ocorrência dos fenômenos e mecanismos oceano atmosfera que interagem e modulam sua variabilidade espaço temporal

(ALBUQUERQUE et al., 2010, ARAÚJO et al., 2013, SANTOS; VITORINO; PEREIRA, 2019). Atualmente pesquisas de Pereira et al., (2013); Monteiro, Jiménez, Pereira (2016); Sousa et al. (2016) e Pereira et al. (2017) utilizam dados de estação meteorológica de superfície para aferir o quantitativo da precipitação e sua influência em outras variáveis hidrológicas na região costeira do Pará. No mesmo sentido cresce a aplicação de dados de precipitação oriundas de fontes alternativas como o sensoriamento remoto, também aplicados para região costeiras em distintas parte do mundo (CRACKNELL, 1999; MALTHUS; MUMBY, 2003, TRALLI et al., 2005; TOMLINSON et al., 2011 e ZAMBRANO-BIGIARINI et al., 2017), principalmente pois muitas estações meteorológicas não contabilizam as chuvas advindas da convecção fluvial e a ausência de estação meteorológica é uma limitação para estudos aplicados a grandes áreas ex. a região amazônica (FITZJARRALD et al., 2008; COHEN et al., 2014).

Diversos são os produtos originários de estimativa de precipitação fornecidos para toda parte do globo, esses dados facilitam a disponibilidade e continuidade no tempo e no espaço permitindo a acurácia na pesquisa (WOLDEMESKEL; SIVAKUMAR; SHARMA, 2013; MAGGIONI et al., 2016). O CMORPH é um conjunto de dados de chuva estimados em nível global por meio de observações de microondas passivas e sensores infravermelhos, oriundas de satélites geoestacionários em baixa órbita (JOYCE et al., 2004). Estudo comparativo entre as diversas fontes de estimativa de precipitação foram realizados para a América do Sul, e apontaram o CMORPH como fonte eficaz e segura, dada entre outras condições a baixa variação topográfica local, o que inclui a região costeira (ZEWELDI; GEBREMICHAEL, 2009). A utilização desses dados também tem sido aplicada a estudos de extremos climáticos, visando conhecer a influência e variabilidade dos mesmos em anos típicos e atípicos de clima (SUN et al., 2015; MORTLOCK; GOODWIN, 2016).

De acordo com Lewis et al. (2011); Marengo et al. (2013b); Monteiro, Jiménez e Pereira (2016) e Pereira et al. (2017) a região amazônica têm sofrido na última década com eventos de seca e inundações cada vez mais severas, o que têm influenciado diretamente as variáveis hidrológicas em estuários da zona costeira. Apesar disso, poucos estudos têm focado na comparação da variabilidade espaço temporal de variáveis hidrológicas em anos típicos e atípicos de clima (El Niño, La Niña e secos), principalmente com a utilização de dados de sensoriamento remoto.

Liu et al. (2020), por exemplo, investigou a influência da precipitação – por meio de dados de sensoriamento remoto (CMORPH) - nas anomalias de salinidade e

temperatura em águas oceânicas no sul da China sob condições típicas de clima – após passagem de ciclone tropical. Estudos realizados na região costeira do Rio do Prata – Argentina, evidenciaram que há modificações nas variáveis físicas, químicas e hidrológicas do estuário durante os episódios de ENOS, mostrando uma redução significativa da diversidade e densidade de biomassa e fitoplâncton, durante a fase do El Niño e abundância durante a fase da La Niña (SATHICQ BAUER; GÓMEZ, 2015).

De acordo com Garcia, Vieira e Winemiller (2001) e Possamai et al. (2018) sobre os efeitos do El Niño em estuários no sul do Brasil, ambos apontam que há uma modificação na abundância e padrões de dominâncias de algumas espécies de peixes, favorecendo positivamente a riqueza desses organismos no estuário durante o evento El Niño, este resultado está atrelado pois o El Niño condiciona maior precipitação e menor salinidade nesta região do Brasil. Em contrapartida, em grande parte da porção norte e nordeste do Brasil o fenômeno El Niño provoca redução nos níveis de precipitação. Estudos de Pereira et al. (2013) comentam que a ocorrência do evento El Niño tende a acentuar o estresse hidrológico experimentado durante a estação seca em estuários amazônicos.

A pesquisa mostrou que durante os anos secos e de El Niño, quando são registrados os menores acumulados de precipitação verificou-se águas mais salinas e com menores valores de clorofila-a e baixa turbidez. Estes resultados estão dentro do esperado para a região e corroborados com Costa et al. (2013) que encontraram alterações hidrológicas e hidrodinâmicas, durante uma estação chuvosa atípica em ano de evento El Niño, com redução nos níveis de precipitação e turbidez, e aumento significativo da temperatura e salinidade. Em anos de ocorrência Seco ou El Niño estudos de Pereira et al. (2017) mostraram o que acontece em um pequeno estuário na costa de manguezal na Amazônia elucidando que as águas tendem a ficar mais salina e oxigenadas, com redução de nutrientes dissolvidos e concentrações clorofila-a quando a precipitação diminuiu durante os períodos de seca estudados entre os anos de 2012 e 2013.

Durante um evento de La Niña e típico, quando os níveis de precipitação são mais elevados registrou-se águas menos salinas, com maiores concentrações de clorofila-a e mais turvas, comparando-se a resultados encontrados por Pereira et al. (2013) e Andrade et al. (2016). Quando ocorre a La Niña na costa amazônica, as atividades hidrológicas e os valores hidrodinâmicos tendem a ficar exacerbados pelo aumento dos níveis de chuva, que deixaram a água menos salina, mas mais turva e mais rica em nutrientes dissolvidos e biomassa fitoplanctônica (PEREIRA et al., 2013). Estudos de Andrade et al. (2016)

mostram que durante a La Niña há uma redução na salinidade e um aumento nas concentrações de nutrientes dissolvidos e biomassa fitoplanctônica para o estuário do Taperaçu.

3.5 Conclusão

Os resultados mostram a distribuição espaço temporal das variáveis hidrológicas em duas regiões estuarinas (Rio Caeté e Taperaçu) e uma região de praia (Ajuruteua) na costa nordeste do estado do Pará, durante anos típicos e atípicos de clima, levando em consideração o quantitativo de precipitação de distintas fontes. A chuva é a principal variável física que controla a hidrologia local, ilustrada pelos dados de sensoriamento remoto que respondem de forma satisfatória para o acumulado real da precipitação registrados pela estação meteorológica de superfície. Os dados do CMORPH foram mais superestimados durante anos típicos e de La Niña, e menos durante os anos considerados Seco e El Niño. O sensoriamento remoto também registrou maiores acumulados durante os meses do período chuvoso (janeiro a junho) e menores durante o período menos seco (julho a dezembro). Todavia respondeu positivamente à sazonalidade da região.

A variabilidade das marés locais também desempenha um papel importante no controle da biodiversidade e distribuição das variáveis hidrológicas. As águas estavam mais salinas durante os anos Seco (2013) e de El Niño (2015 e 2016) principalmente no segundo semestre, quando os valores de evaporação superam o de precipitação. A clorofila-a estava mais concentrada nos estuários durante os anos de 2013, 2015 e 2016, anos de Seco e El Niño, respectivamente, com exceção para a praia de Ajuruteua, que registrou maior clorofila-a em ano típico de 2014. A turbidez mostrou grande variabilidade entre os anos onde no estuário do rio caeté o ano de El Niño (2015 e 2016) foi mais significativo. Já para o Taperaçu os anos de La Niña (2017) e seco (2013) e por fim para praia durante os anos de El Niño e Seco.

Os anos Seco (2013) e El Niño (2015 e 2016) apresentaram maiores correlações positivas com a distribuição das variáveis hidrológicas, assim infere-se que durante estes eventos haja maior variabilidade da salinidade, clorofila e turbidez nos estuários e região de praia. Durante os anos típicos (2014) e de La Niña (2017) também foram registrados variabilidade, porém em correlações menores. As variáveis do estuário do Caeté foram mais correlacionadas durante os anos Seco (2013) e El Niño (2015 e 2016), provavelmente pois se trata de um ambiente com maior área de drenagem, permitindo que a ausência de água pluvial seja mais pronunciada nas variáveis hidrológicas. Para o

estuário do Taperaçu que têm pouca entrada de água doce e altos níveis de energia hidrodinâmica, as variáveis responderam de forma satisfatória com o esperado, com maiores correlações nos anos de Seco (2013) e La Niña (2017). Para a praia de Ajuruteua que se encontra em mar aberto, sujeito a vazão dos rios, os anos de maiores correlações com suas variáveis foram os anos Típicos (2014) e El Niño (2015 e 2016).

Referências

ALBUQUERQUE, M. F. *et al.* Precipitação nas mesorregiões do estado do Pará: climatologia, variabilidade e tendências nas últimas décadas (1978-2008). **Revista Brasileira de Climatologia**, v.6, n.6, p. 151-168, jun. 2010.

AMANAJÁS, J.C.; BRAGA, C.C. Padrões espaço-temporais pluviométricos na Amazônia Oriental usando análise multivariada. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 27, n. 4, p. 423-434, 2012.

ANDRADE, M.P. *et al.* Effects of a La Niña event on hydrological patterns and copepod community structure in a shallow tropical estuary (Taperaçu, Northern Brazil). **Journal of Marine Systems**, v.164, p.128–143, 2016.

ARAÚJO JR, W. P; ASP, N. E. Hydrodynamic connectivity between two macrotidal Amazonian estuaries. **Journal of Coastal Research**, n. 65, p. 1086-1091, 2013.

ARAÚJO, R. G. *et al.* A influência do evento El Niño-Oscilação Sul e Atlântico Equatorial na precipitação sobre as regiões norte e nordeste da América do Sul. **Acta Amazônica**, v. 43, n. 4, p. 469-480, 2013.

ASP, N. E. *et al.* A dinâmica de uma Amazônica dominada por atritos Estuário. **Revista Brasileira de Oceanografia**, v.60, n.3. p.391–403, 2012.

BARBOSA, C. C. F. *et al.* Geospatial analysis of spatiotemporal patterns of pH, total suspended sediment and chlorophyll-a on the Amazon floodplain. **Limnology**, v. 11, n. 2, p. 155-166, 2010.

BARBOSA, V.M. *et al.* Morfodinâmica durante uma maré equinocial de sizígia em uma praia de macromaré do Litoral Amazônico (Praia de Ajuruteua-PA, Brasil). **Boletim Paranaense de Geociências**, v.60, p.31-43, 2007.

BARLETTA-BERGAN, A.; BARLETTA, M.; SAINT-PAUL, U. Structure and seasonal dynamics of larval fish in the Caeté River Estuary in North Brazil. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 54, n. 2, p. 193-206, 2002.

BATISTA, I.M.S.; SIMONIAN, L.T.L. Implicações políticas, econômicas e socioambientais da RESEX Mãe Grande de Curuçá: perspectivas de desenvolvimento sustentável no estuário paraense?. **Novos Cadernos NAEA**, v.16, n.1, p. 203-220, jun. 2013.

BRONDÍZIO, E. *et al.* Cobertura do solo no estuário amazônico: articulação do Mapeador Temático com dados botânicos e históricos. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.62, n.8, p. 921-930, 1996.

BRUGNOLI-OLIVERA, E.; MORALES-RAMÍREZ, A. Trophic planktonic dynamics in a tropical estuary, Gulf of Nicoya, Pacific coast of Costa Rica during El Niño 1997 event. **Revista de Biología Marina y Oceanografía**, v. 43, n. 1, p. 75-89, 2008.

CHIANG, J. C. H.; VIMONT, D. J. Analogous meridional modes of atmosphere–ocean variability in the tropical Pacific and tropical Atlantic. **Journal Climate**, v. 17, n. 21, p. 4143-4158, 2004.

CHILDERS, D. L. *et al.* Relating precipitation and water management to nutrient concentrations in the oligotrophic “upside-down” estuaries of the Florida Everglades. **Limnology and Oceanography**, v. 51, n. 1part2, p. 602-616, 2006.

COHEN, J. C. P. *et al.* Radar -observed spatial and temporal rainfall variability near the Tapajos-Amazon confluence. **Brazilian Journal of Meteorology**, v. 29, p. 23-30, 2014.

COHEN, J.C. P.; SILVA DIAS, M. A F.; NOBRE C.A. Environmental conditions associated with Amazonian squid lines: a case study. **Monthly Weather Review, Boston**, v. 123, n. 11, p. 3163-3174, 1995.

CONOVER, W.O.J. **Practical nonparametric statistics**. Nova York: John Wiley. 1971.

COSTA, K. G. *et al.* Tidal-induced changes in the zooplankton community of an Amazon estuary. **Journal of Coastal Research**, v. 289, p. 756-765, 2013.

CRACKNELL, A. P. Remote sensing techniques in estuaries and coastal zones an update. **International Journal of Remote Sensing**, v. 20, n. 3, p. 485-496, 1999.

DELCROIX, T. *et al.* Precipitation and sea-surface salinity in the tropical Pacific Ocean. **Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers**, v. 43, n. 7, p. 1123-1141, 1996.

DIRETORIA DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO – DHN. **Previsão de maré**. 2015. <http://www.mar.mil.br/dhn/chm/boxprevisaomare/tabuas>. Acesso em 30 de maio de 2020.

DÍEZ-MINGUITO, M. *et al.* Spatio-temporal distribution, along-channel transport, and post-riverflood recovery of salinity in the Guadalquivir estuary (SW Spain). **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 118, n. 5, p. 2267-2278, 2013.

DOGLIOTTI, A. I. *et al.* A single algorithm to retrieve turbidity from remotely-sensed data in all coastal and estuarine waters. **Remote Sensing of Environment**, v. 156, p. 157-168, 2015.

DUARTE, A.L.S.; VIEIRA, J.M.P. **Caracterização dos ambientes estuarinos**: mistura em estuários. Braga, Portugal: Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, 1997.

FITZJARRALD, D. R. *et al.* Spatial and temporal rainfall variability near the Amazon-Tapajós confluence. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, v.113, n.1, p.1-17, 2008.

GARCIA, A. M.; VIEIRA, J. P.; WINEMILLER, K. O. Dynamics of the shallow-water fish assemblage of the Patos Lagoon estuary (Brazil) during cold and warm ENSO episodes. **Journal of Fish Biology**, v. 59, n. 5, p. 1218-1238, 2001.

GEORGIU, I. Y.; FITZGERALD, D. M.; STONE, G. W. The impact of physical processes along the Louisiana coast. **Journal of Coastal Research**, SI 44, p.72-89, 2005.

GHOLIZADEH, M. H.; MELESSE, A. M.; REDDI, L. A comprehensive review on water quality parameters estimation using remote sensing techniques. **Sensors**, v.16, n.8, p. 1298, 2016.

GOES, J.I. *et al.* Influence of the Amazon River discharge on the biogeography of phytoplankton communities in the western tropical north Atlantic. **Progress in Oceanography**. v.120, p.29–40, 2014.

GOSCHEN, W. S.; SCHUMANN, E. H. **The physical oceanographic processes of Algoa Bay, with emphasis on the western coastal region**. [S.l.]: South African Environmental Observation Network (SAEON) and the Institute of Maritime Technology (IMT). IMT document number: PO106-10000-730002, 2011. p. 1-84.

GOUVEIA, N. A. *et al.* The salinity structure of the Amazon River plume drives spatiotemporal variation of oceanic primary productivity. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, v.124, n.1, p.147-165, 2019.

GRATIOT, N. *et al.* Significant contribution of the 18.6 year tidal cycle to regional coastal changes. **Nature Geoscience**, v.1, n.3, p.169-172, 2008.

GUERRA, A.J.T.; CUNHA, S.B. **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos**. Bertrand Brasil, Rio de Janeiro, p. 472, 1998.

INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE (ICMBIO). **Lista de unidades de conservação do ano 2005**. Disponível: <https://www.icmbio.gov.br/portal/unidadesdeconservacao>, acessado em 29 de maio de 2020.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). **Histórico de dados**. <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesConvencionais>. Acesso em 30 de julho de 2019.

JOYCE, R. J. *et al.* CMORPH: A method that produces global precipitation estimates from passive microwave and infrared data at high spatial and temporal resolution. **Journal of Hydrometeorology**, v. 5, n. 3, p. 487-503, 2004.

KAISER, J.; LAMY, F.; HEBBELN, D. A 70-kyr sea surface temperature record off southern Chile (Ocean Drilling Program Site 1233). **Paleoceanography**, v. 20, n. 4, 2005.

LARA, R.J.; DITTMAR, T. Nutrient dynamics in a mangrove creek (North Brazil) during the dry season. **Mangroves and Salt Marshes**, v.3, p.185-195, 1999.

LEWIS, S. L. *et al.* The 2010 Amazon drought. **Science**, v.331, n. 6017, p. 554, 2011.

LIMBERGER, L.; SILVA, M. E. S. Precipitação e vazão mensal na Amazônia. **Revista Geonorte**, v.3, n.8, p.719-728, 2012.

- LIU, F. *et al.* Importance of precipitation on the upper ocean salinity response to Typhoon Kalmaegi (2014). **Water**, v.12, n.2, p.614, 2020.
- MAGGIONI, V. *et al.* A review of merged high-resolution satellite precipitation product accuracy during the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) era. **Journal of Hydrometeorology**, v. 17, n. 4, p. 1101-1117, 2016.
- MALTHUS, T. J.; MUMBY, P. J. Remote sensing of the coastal zone: an overview and priorities for future research. **International Journal of Remote Sensing**, v.42, n.13 p. 2805-2815, 2003.
- MARENGO, J. A. *et al.* Onset and End of the Rainy Season in the Brazilian Amazon Basin. **Journal of Climate**. v.14, n.5, p.833–852, 2001.
- MARTORANO, L. G. *et al.* **Estudos climáticos do estado do Pará, classificação climática (Köppen) e deficiência hídrica (Thornthwaite, Mather)**. Belém; Rio de Janeiro: SUDAM; EMBRAPASNLCS, 1993.
- MELACK, J. M.; HESS, L. L. Remote sensing of the distribution and extent of wetlands in the Amazon basin. In: WOLFGANG J. *et al.* (ed.). **Amazonian floodplain forests**. Dordrecht: Springer, 2010. p. 43-59.
- MONTEIRO, M.C.; PEREIRA, L.C.C.; OLIVEIRA, S.M.O. Morphodynamic changes of a macrotidal sand beach in the Brazilian Amazon coast (Ajuruteua-Pará). **Journal of Coastal Research**, v.56, p.103-107, 2009.
- MONTEIRO, M.C; JIMÉNEZ, J.A; PEREIRA, L.C.C. Natural e controles humanos da qualidade da água de um estuário amazônico (Caeté-PA, Brasil). **Ocean and Coastal Management**, v.124, p.42–52, 2016.
- MORTLOCK, T. R.; GOODWIN, I D. Impactos do ENSO do Pacífico central aprimorado no clima de ondas e morfologia de promontório-baía. **Continental Shelf Research**, v. 120, p. 14-25, 2016.
- NOERNBERG, M. A. *et al.* Remote sensing and GIS integration for modelling the Paranaguá estuarine complex-Brazil. **Journal of Coastal Research**, p. 1627-1631, 2006.
- PARSONS, T.R.A.; STRICKLAND, J.D.H. Discussion of spectrophotometric determination of marine-plant pigments, with revised equations for ascertaining chlorophylls and carotenoids. **Journal of Marine Research**, v.21, p.155-163, 1963.
- PAZ, A. C.; FRÉDOU, F. L.; FRÉDOU, T. Caracterização da atividade pesqueira em Vila do Conde (Barcarena, Pará), no estuário amazônico. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Humanas**, v.6, n.2, 307-318, 2011.
- PEREIRA, L. C. C. *et al.* Influence of a drought event on hydrological characteristics of a small estuary on the amazon mangrove coast. **Estuaries and Coasts**, v.41, n.3, p.676-689, 2017.
- PEREIRA, L. C. C. *et al.* Use and occupation in Bragança litoral, Brazilian Amazon. **Journal of Coastal Research**, p. 1116-1120, 2007.

PEREIRA, L. C. C. *et al.* What happens on an equatorial beach on the Amazon coast when La Niña occurs during the rainy season? **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v.135, p.116-127, 2013.

PEREIRA, L.C.C. *et al.* Morphological and sedimentological changes in a macrotidal sand beach in the Amazon Littoral (Vila dos Pescadores, Pará, Brazil). **Journal of Coastal Research**, v.56, p.113-117, 2009.

POSSAMAI, B. *et al.* Temporal variability (1997-2015) of trophic fish guilds and its relationships with El Niño events in a subtropical estuary. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 202, p. 145-154, 2018.

PRIMO, A. L. *et al.* Changes in zooplankton diversity and distribution pattern under varying precipitation regimes in a southern temperate estuary. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 82, n. 2, p. 341-347, 2009.

RODRIGUES, E. I.; CUTRIM, M. V. J. Relações entre as variáveis físicas, químicas e fitoplanctônicas de três áreas estuarinas da costa Norte do Brasil-São José de Ribamar, Cedral e Cajapió, Estado do Maranhão. **Arquivos de Ciência do Mar**, v.43, n.2, p.45-54, 2010.

RODRIGUES, S. W. P.; SOUZA-FILHO, P. W. M. Use of multi-sensor data to identify and map tropical coastal wetlands in the Amazon of Northern Brazil. **Wetlands**, v. 31, n. 1, p. 11-23, 2011.

RODRIGUEZ, J. J.; WINDEVOXHEL, N. J. **Análisis regional de la situación de la zona marina costera centroamericana**. Washington D.C. BID, 1998. No – ENV 121.

SANTOS, M. R. S; VITORINO, M. I.; PEREIRA, L. C. C. Spatiotemporal variation in the precipitation of the amazon coastal zone: use of remote sensing and multivariate analysis. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 25, p.35-53, 2019.

SATHICQ, M. B.; BAUER, D.E.; GÓMEZ, N. Influence of El Niño Southern Oscillation phenomenon on coastal phytoplankton in a mixohaline ecosystem on the southeastern of South America: Río de la Plata estuary. **Marine Pollution Bulletin**, v. 98, n. 1-2, p. 26-33, 2015

SCHETTINI, C. A. F. Caracterização física do estuário do Rio Itajaí-Açu, SC. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 7, n. 1, p. 123-142, 2002.

SOUSA, N. S.S *et al.* Efeitos do esgoto em ambientes naturais da Região amazônica (Pará-Brasil). **Journal of Coastal Research**, v.75, p. 158-162, 2016.

SOUZA FILHO, P. W. M.; MARTINS, E. do S. F.; COSTA, F. R. da. Using mangroves as a geological indicator of coastal changes in the Bragança macrotidal flat, Brazilian Amazon: a remote sensing data approach. **Ocean & Coastal Management**, v. 49, n. 7-8, p. 462-475, 2006.

SOUZA FILHO, P. W. M.; PARADELLA, W. R. Reconhecimento das principais feições geobotânicas ao longo da costa do manguezal de Bragança (Amazônia Brasileira) a partir dos dados Landsat TM e RADARSAT-1. **Wetlands Ecology and Management**, v. 10, n. 2, p.121-130, 2002.

SOUZA FILHO, P. W. M. *et al.* O. Amazon Coastal Zone: the regional scenario and S & T indicators. *In: SOUZA FILHO, P. W. M.; CUNHA, E.R. S. P.; SALES, M. E. C.; SOUZA L. F. M. O.; COSTA, F. R. (eds.). Bibliography of the Amazon Coastal Zone: Brazil. Belém: MPEG; UFPA; PETROBRÁS, 2005. p. 9-20.*

STRICKLAND, J.D.H.; PARSONS, T.R.A. A Practical handbook of análise da água do mar. **Journal of Fisheries Research**. Bd. Canadá 1972, Ottawa. Boletim, 167, 2^a ed. 310p. 1977.

SUMNER, D. M.; BELAINEH, G. Evaporation, precipitation, and associated salinity changes at a humid, subtropical estuary. **Estuaries**, v. 28, n. 6, p. 844-855, 2005.

SUN, X. *et al.* A global analysis of the asymmetric effect of ENSO on extreme precipitation. **Journal of Hydrology**, v.530, p.51-65, 2015.

TOMLINSON, C. J. *et al.* Remote sensing land surface temperature for meteorology and climatology: A review. **Meteorological Applications**, v.18, n.3, p. 296-306, 2011

TRALLI, D. M. *et al.* Satellite remote sensing of earthquake, volcano, flood, landslide and coastal inundation hazards. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 59, n. 4, p. 185-198, 2005.

UNESCO. **Monograph on oceanographic methodology**. Determination of photosynthetic pigments in sea Water. United Nations Education, Science and Culture Organization, Paris, 1966. 69p.

VAZ, N.; DIAS, J. M. Hydrographic characterization of an estuarine tidal channel. **Journal of Marine Systems**, v. 70, n. 1-2, p. 168-181, 2008.

WANG, N. *et al.* Evaluating satellite-based and reanalysis precipitation datasets with gauge-observed data and hydrological modeling in the Xihe River Basin, China. **Atmospheric Research**, v. 234, p. 104746, 2020.

WILKERSON, F.P. *et al.* Hydrography, nutrients and chlorophyll during El Niño and La Niña 1997–99 winters in the Gulf of the Farallones. **California Progress in Oceanography**, v.54, p.293–310, 2002.

WOLDEMESKEL, F. M.; SIVAKUMAR, B.; SHARMA, A. Merging gauge and satellite rainfall with specification of associated uncertainty across Australia. **Journal of Hydrology**, v. 499, p. 167-176. 2013.

ZAMBRANO-BIGIARINI, M. *et al.* Temporal and spatial evaluation of satellite-based rainfall estimates across the complex topographical and climatic gradients of Chile. **Hydrology and Earth System Sciences**, v.21, n.2, 1295-1320, 2017.

ZEWELDI, D. A.; GEBREMICHAEL, M. Evaluation of CMORPH precipitation products at fine space–time scales. **Journal of Hydrometeorology**, v. 10, n.1, p. 300-307, 2009.

CAPÍTULO 4 VULNERABILIDADE SOCIOAMBIENTAL ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS DOS MUNICÍPIOS COSTEIROS NO ESTADO DO PARÁ¹⁰

Resumo: O estudo da vulnerabilidade socioambiental associado às mudanças climáticas é uma das temáticas mais discutidas pela comunidade científica internacional. Os efeitos das mudanças do clima sobre a sociedade têm origem em diferentes causas, e sua análise deve levar em consideração os contextos ambiental, econômico e social de uma população. Deste modo, os riscos associados a eventos extremos de clima devem ser feitos de forma integrada e interdisciplinar. A presente pesquisa contribuiu para mapear a vulnerabilidade dos municípios da zona costeira do estado do Pará, com vistas à redução dos efeitos causados pelas mudanças climáticas e sociais. Para tanto, se aplicou o Índice de Vulnerabilidade Municipal (IVM), com base na integração de indicadores socioeconômicos, epidemiológicos e climáticos. Os dados foram combinados com os cenários climáticos Representative Concentration Pathway (RCP) 4.5 e 8.5, com base no Índice de Vulnerabilidade Municipal (IVM). Os resultados mostraram que o Índice de Sensibilidade (ISe) e o Índice Sociodemográfico (ISd) apontaram a maior influência na vulnerabilidade atual dos municípios. Quando a vulnerabilidade atual estava relacionada às projeções futuras de mudanças climáticas verificou-se os municípios mais vulneráveis estão na região da Ilha do Marajó – oeste da área de estudo, onde o IVM varia entre 1 (Afuá) e 0,55 (Soure) para os cenários 4.5 e 8.5, respectivamente. Acredita-se que estes resultados possam contribuir para a adoção efetivas de políticas públicas, priorizando os municípios mais vulneráveis e preparando-os para lidar com os aspectos adversos das mudanças do clima.

Palavra Chave: Clima, Riscos, Socioambiente, Região Costeira, Pará.

Abstract: The study of socio-environmental vulnerability associated with climate change is one of the themes, but discussed by the international community. The effects of climate change on a society originate from different causes, and its analysis must take into account the environmental, economic and social contexts of a population. Thus, the risks associated with extreme weather events must be carried out in an integrated and interdisciplinary way. At the moment, the research contributed to map the vulnerability of municipalities in the coastal zone of the state of Pará, with a view to reducing the

¹⁰ Aceito para publicação na Revista Ambiente e Sociedade – Qualis A2 – Ciências ambientais.

effects caused by climate and social changes. For that, the Municipal Vulnerability Index (IVM) was applied, based on the integration of socioeconomic, epidemiological and climatic indicators. The data were combined with the Representative Concentration Pathway (RCP) 4.5 and 8.5 climatic scenarios, based on the Municipal Vulnerability Index (IVM). The results induced that the Sensitivity Index (ISe) and the Sociodemographic Index (ISd) pointed out the greatest influence on the current vulnerability of the municipalities. When the current vulnerability was related to future projections of climate change, the municipalities were found, but vulnerable are in the region of Ilha do Marajó - west of the study area, where the IVM varies between 1 (Afuá) and 0.55 (Soure) for scenarios 4.5 and 8.5, respectively. It is believed that these results receive a contribution to the effective adoption of public policies, prioritizing the municipalities, but vulnerable and preparing them to deal with the adverse aspects of climate change.

Keywords: Climate, Risks, Socioenvironment, Coastal Region, Pará.

4.1 Introdução

As regiões litorâneas são particularmente vulneráveis às mudanças do clima, uma vez que estas são diretamente influenciadas por processos oceânicos, atmosféricos e continentais (NEVES; MUEHE, 2010). O Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2014) afirma que as regiões costeiras são as áreas mais afetadas pelas mudanças climáticas, levando em consideração o aumento médio no nível dos oceanos e a intensidade de extremos climáticos. No Brasil, as cidades litorâneas como Florianópolis, Rio de Janeiro, Salvador, João Pessoa, Natal e Belém deverão registrar temperaturas mais altas com picos de calor mais intensos, também sofrerão com marés altas, ressacas do mar e fortes precipitações (PBMC, 2016).

A zona costeira Brasileira denota grandes extensões territoriais ocupadas, atualmente 463 municípios estão nos primeiros 100 km do litoral, compreendendo mais de 17,4 milhões de domicílios ou aproximadamente 30% da população, o equivalente a 50,7 milhões de habitantes (IBGE, 2019). Estes municípios e suas populações estão expostas aos riscos ambientais costeiros causados pelas mudanças climáticas no Brasil. Na região costeira da amazônica está uma das maiores áreas de concentração humana (RODRIGUES; CASTRO, 2013), sendo marcada pela presença de três regiões

metropolitanas: Macapá (AP), Belém (PA) e São Luís (MA), concentrando aproximadamente 3 milhões de pessoas (IBGE, 2019) caracterizada com um rápido e desordenado processo de urbanização o que está acarretando sérios problemas de caráter socioambiental: ocupação territorial em áreas de risco, desmatamento, sobrepesca, contaminação do lençol freático, contaminação dos rios e estuários (PEREIRA et al., 2009).

A partir desta interpretação, as mudanças climáticas ganham maior visibilidade, pois trazem profundas implicações sociais, econômicas, políticas e ambientais (OJIMA. MARANDOLA JR, 2013; SANTOS et al., 2017). As principais consequências das mudanças climáticas em termos ambientais e sociais são apresentadas pelo aumento da temperatura, elevação do nível do mar, extremos de precipitação, intensificação do ciclo hidrológico com maior incidência de secas e inundações (CONTI, 2005; BESSAT, 2015). Essas alterações no clima global irão influenciar diretamente na vida das populações provocando diferentes impactos e interferindo no grau e/ou percepção de vulnerabilidade socioambiental (RIBEIRO, 2010; IPCC, 2014; SANTOS et al., 2017).

A vulnerabilidade socioambiental apresenta diferentes abordagens, além de representar um fenômeno complexo e multidimensional, envolvendo uma combinação de fatores que determinam o grau, em que um grupo é colocado em risco por um evento discreto e identificável na natureza e/ou sociedade (MAIOR; CÂNDIDO, 2014). Neste estudo, a vulnerabilidade socioambiental foi entendida como: “um conjunto das características de uma pessoa ou grupo, em termos de sua capacidade de antecipar, enfrentar, resistir e se recuperar do impacto de um fenômeno perigoso” (BLAIKIE et al., 2005; O’BRIEN et al., 2011).

Estudos científicos sobre a vulnerabilidade socioambiental vêm se expandindo nas últimas décadas, logo, torna-se necessário o conhecimento específico dos possíveis moduladores da vulnerabilidade socioambiental nas diversas escalas territoriais - global, regional, local (ZANELLA et al., 2013; SCHUMANN; MOURA, 2015; MAVROMATIDI et al., 2018; GUPTA et al., 2020). Este tema está principalmente atrelado à adaptação da sociedade às mudanças do clima, requerido à grande ocorrência de eventos extremos, sobretudo de extremidades no nível de precipitação, que afetam diretamente a coletividade humana (TIBÚRCIO; CORRÊA, 2012; SANTOS et al., 2017).

Em 2014, foi lançado o projeto “Construção de Indicadores para Avaliação Municipal da Vulnerabilidade Humana às Mudanças Climáticas no Brasil”, com o objetivo de desenvolver uma metodologia para avaliar a vulnerabilidade da população

frente às mudanças climáticas, por meio do uso de indicadores que ajudam a medir e comparar a realidade dos municípios em alguns estados do país (CONFALONIERI et al., 2016; QUINTÃO et al., 2017). Estudos recentes foram publicados para os estados do Amazonas, Espírito Santos e do Maranhão (MENEZES et al., 2018; SANTOS et al., 2019; VOMMARO; MENEZES; BARATA, 2020) como resultados do projeto, utilizando a metodologia e o software do Sistema de Vulnerabilidade Climática (Sisvuclima), método que oferece a espacialização dos indicadores e possibilita o conhecimento dos aspectos e locais mais vulneráveis, o que facilita o planejamento de estratégias, ações e recursos para a adaptação climática (FIOCRUZ, 2016).

Neste contexto, é importante o desenvolvimento de pesquisas que correlacionem metodologias visando mensurar a vulnerabilidade socioambiental a nível municipal, atrelando o componente climático e social, ambas com caráter interdisciplinar, principalmente em locais e regiões costeiras com a ausência de pesquisas nesse foco (IWAMA; BATISTELLA; FERREIRA, 2014, ZANETTI; SOUSA JUNIOR; FREITAS, 2016). Estudos de Santos et al. (2017) apresentam a vulnerabilidade socioambiental por meio de índices e indicadores para a região metropolitana da Amazônia, elucidando a importância do índice climático na vulnerabilidade local. No estado do Pará, vários autores como Souza-Filho (2001); Szlafsztein e Sterr (2007, 2010) e Espírito-Santo e Szlafsztein (2016), desenvolveram pesquisas e metodologias com uso de índices e indicadores para tentar medir o grau de vulnerabilidade ambiental e social nos municípios da zona costeira do Nordeste do Pará, todavia suas pesquisas locais não incluíram os cenários de mudança climática, conforme o projeto conduzido por Confalonieri et al. (2016).

A contribuição desta pesquisa consiste em apresentar que a ocorrência de eventos extremos de clima, identificados pelos cenários climáticos, podem elevar os índices de vulnerabilidades em suas múltiplas facetas, deixando a sociedade dos municípios costeiros mais exposta aos riscos socioambientais. Sob o ponto de vista da mudança do clima em curso, que é um problema global gravíssimo, com consequências em todas as esferas da vida humana – desde a política pública até a segurança alimentar, tema particularmente crítico quando analisado sob o viés socioambiental. Neste cenário, este estudo teve o objetivo de mapear a vulnerabilidade socioambiental dos municípios costeiros do estado do Pará, por meio do Índice Municipal de Vulnerabilidade (IMV), mediante os cenários de mudanças climáticas. Para este estudo adotou-se a concepção de vulnerabilidade a partir de características como: exposição, sensibilidade e capacidade

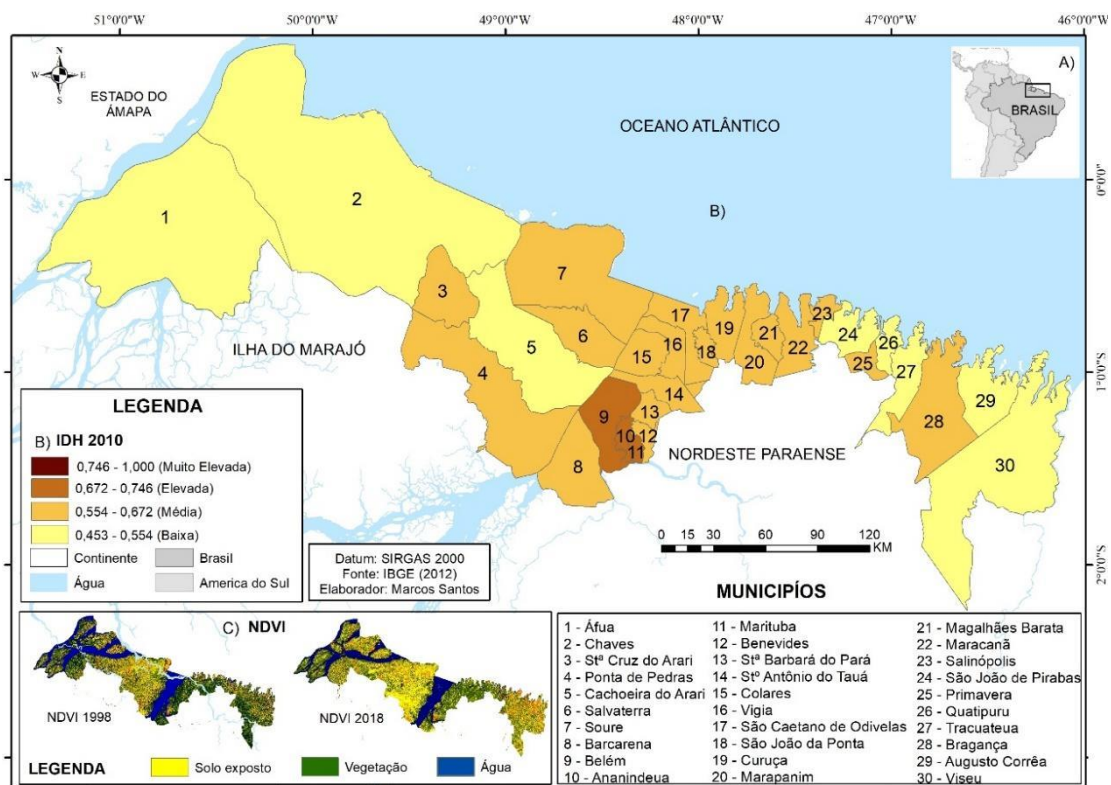
adaptativa, onde o sistema socioecológico¹¹ contribui para tornar as pessoas e territórios mais ou menos vulneráveis.

4.2 Material e métodos

4.2.1 Caracterização da área de estudo

A pesquisa abrangeu os 30 municípios costeiros do estado do Pará (MMA, 2020), que estão situados na porção leste da região costeira da Amazônia, pertencentes às mesorregiões do Nordeste Paraense e do Marajó (Figura 19A). A área de estudo possui uma extensão aproximada de 52.520 km², com população estimada em 3.037.179 habitantes (IBGE, 2019). A região costeira paraense detém 36% da população em aproximadamente 5% do território estadual, e grande parte dos municípios apresentam o Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) com indicador baixo a médio (PNUD, 2019) (Figura 19B).

Figura 19- (A) Mapa de localização da área de estudo na América do Sul. (B) Área de estudo com dados do Índice de Desenvolvimento Humano (IDH). (C) Área de estudo com Índice de Cobertura de Vegetação (NDVI) 1998 a 2018.



Fonte: Do autor.

¹¹ Integração dos processos e componentes socioeconômicos e biofísicos (MACHLIS et al., 1997).

Os municípios estudados apresentam formação histórica distintas, tamanhos de população e peso econômico diferentes, condições essas que devem ser levadas em consideração na análise e interpretação dos resultados. A vegetação da região apresenta formações pioneiras, floresta ombrófila densa, áreas de manguezais, e nas últimas décadas têm indicado modificações no índice de vegetação, conforme verifica-se na imagem de NDVI (Figura 19C) (IBGE, 2012).

O clima regional é caracterizado como equatorial úmido, com duas estações bem definidas, com período chuvoso compreendido entre dezembro e maio, e menos chuvoso de junho a novembro (AMANAJÁS; BRAGA, 2012). O regime chuvoso apresenta um volume pluviométrico entre 125 a 400 mm/mês, gerados pela presença da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) principais sistemas meteorológicos precipitantes, com temperatura média de 23°C e umidade relativa do ar de 85%. No regime menos chuvoso a precipitação fica com acumulados entre 30 e 150 mm/mês, provocados pela atuação de aglomerados convectivos, linhas de Instabilidade e sistemas locais, registrando temperatura média de 26°C e umidade relativa do ar em entorno de 70% (SANTOS et al., 2016; SOUZA et al., 2017).

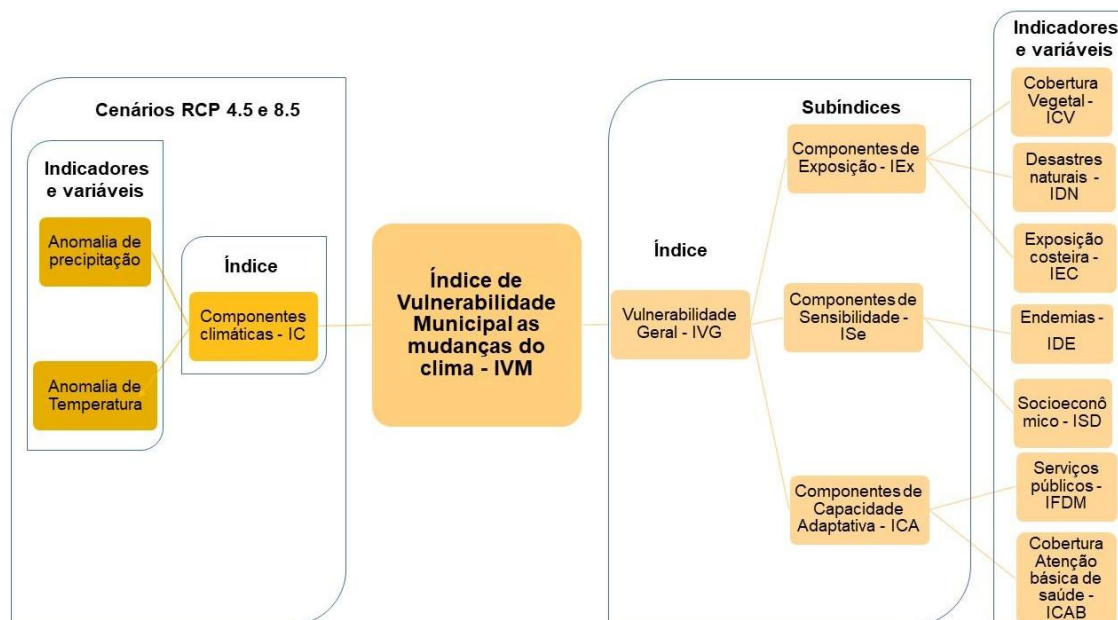
A área de estudo está inserida na unidade geomorfológica litoral de mangues e falsas rias, e tabuleiros paraenses (IBGE, 2009), formada por um conjunto de feições deposicionais de origem fluvial, marinha e lacustre, envolvendo também uma série de ilhas, baías e canais; onde destacam-se o relevo plano com baixa amplitude e elevações menores que 100m (DANTAS et al., 2014). Outra característica peculiar da área de estudo é o regime de macromarés com valores máximos de 6m de altura e extensa área de manguezais (PEREIRA et al., 2009).

4.2.2 Modelo conceitual do Índice de Vulnerabilidade Municipal - IVM

O índice de vulnerabilidade municipal (IVM) aplicado neste estudo procede de pesquisas anteriores realizados em outras localidades brasileiras (BARATA et al., 2011; CONFALONIERI et al., 2016; QUINTÃO et al., 2017; MENEZES et al., 2018; SANTOS et al., 2019 e VOMMARO; MENEZES; BARATA, 2020), e foi adaptado nos modelos conceituais do Índice de Vulnerabilidade Humana apresentado em Quintão et al. (2017) e pelo modelo de IVM de Vommaro, Menezes e Barata (2020). Conceitualmente, o IVM considera que os múltiplos processos de desenvolvimento humano, social, ambiental e econômico que ocorrem nos municípios contribuem para o perfil de vulnerabilidade

frente às mudanças climáticas, portanto, partindo da concepção de Adger (2006) e Quintão et al. (2017), esse perfil pode ser caracterizado por três dimensões básicas da vulnerabilidade geral (exposição, sensibilidade e capacidade adaptativa), somados aos cenários de mudanças climáticas apresentado nesse estudo (Figura 20).

Figura 20- Modelo conceitual adotado para o presente estudo.



Fonte: Modificado de Quintão et al. (2017).

A exposição é caracterizada pela natureza e intensidade do estresse ambiental que os municípios costeiros estão expostos: biofísico – área de cobertura vegetal, extensão da linha costeira e climático – extremos de chuva e temperatura) ou ainda sociopolítico analisado por um sistema (o território) (VOMMARO; MENEZES; BARATA, 2020). As características desse estresse incluem sua dimensão, frequência, e extensão da área de risco. A sensibilidade investiga a intensidade em que um sistema pode sofrer danos ou ser afetado por distúrbios (climáticos), conforme determinado pelas suscetibilidades intrínsecas ao sistema. Nesta pesquisa considera-se as endemias com vinculação hídrica e processos socioeconômicos que estão suscetíveis as anomalias climáticas.

A capacidade adaptativa é promovida pela condição que os sistemas têm de realizar ou introduzir mudanças para acomodar tensões ambientais, políticas e a capacidade de gerenciar melhor quaisquer consequências, expandindo assim a faixa de variabilidade com a qual ele pode lidar. Considerando-se neste estudo os serviços públicos e básicos de saúde para atendimento da população em casos adversos de clima. Nesse contexto, a pesquisa considera que as mudanças climáticas atuam como uma influência externa que

pode modificar o perfil de vulnerabilidade em cada município, transformando as populações residentes mais vulneráveis aos impactos socioambientais.

4.2.3 Índices e subíndices

O método utilizado nesta pesquisa combina índices sintéticos que fornecem uma medida comparativa para a vulnerabilidade em diferentes aspectos e sua associação a extremos climáticos (Quadro 4.1). As informações são analisadas estatisticamente para cada município, considerando a incidência ao tamanho populacional superior a 10.000 e gerando um Índice de Vulnerabilidade Municipal, que é calculado em relação às mudanças climáticas nas duas vias de concentração representativa (RCPs) ¹²4.5 e 8.5. A seleção dos dados foi baseada em: 1) disponibilidade dos dados, 2) no arcabouço conceitual estabelecido por pesquisas anteriores para a região amazônica (MENEZES et al., 2018 e VOMMARO; MENEZES; BARATA, 2020) e 3) literatura científica sobre quantificação e avaliação da vulnerabilidade (CONFALONIERI et al., 2016; QUINTÃO et al., 2017).

O Índice de Vulnerabilidade Geral (IVG) representa as condições atuais dos municípios costeiros do Pará e está relacionado aos subíndices de exposição (IEx), sensibilidade (ISe) e capacidade adaptativa (ICA). O Índice Climático (IC) foi construído a partir de anomalias climáticas geradas pela diferença absoluta entre o clima projetado (2020-2050) e as observações climatológicas da linha de base (1961-1990). As variáveis climáticas utilizadas a partir do modelo de saída foram as temperaturas médias anuais (TP2M) em graus célsius e a precipitação total (PREC) em milímetros para o período de 2020 a 2050 fornecidos pelo modelo ETA / HadGEM2 (CHOU et al., 2014, CPTEC, 2019). Adotou-se os cenários referentes aos RCPs 4.5 e 8.5 que foram usados pelo Painel Climático (IPCC, 2014). O RCP 4.5 corresponde a uma estabilização das emissões de gases de efeito estufa (GEE) para o ano 2100 (melhor cenário), e o RCP 8.5 corresponde a um aumento nas emissões de GEE para o ano 2100 (pior cenário).

O IVM é a agregação de IVC e o IC 4.5 ou IC 8.5 obtidos para cada município, representando sinteticamente a relação entre a vulnerabilidade atual e os cenários futuros sob as mudanças climáticas. A obtenção dos dados que compõem os indicadores e variáveis foram retirados de sites governamentais de acordo com o quadro 4.1 e as referências bibliográficas deste trabalho.

¹² Projeções das concentrações de Gases de Efeito Estufa (GEEs), gases quimicamente ativos, aerossóis e uso e cobertura do solo para o século XXI. (VAN VUUREN et al., 2011)

Quadro 2- Variáveis utilizadas

<p style="text-align: center;">Índice de Vulnerabilidade Municipal (IVM)</p> $IVM = \frac{IVG+IC}{2}$				
<p style="text-align: center;">Índice de Vulnerabilidade Geral (IVG)</p> $IVG = \frac{I_{Ex}+I_{Se}+I_{CA}}{3}$				
<p style="text-align: center;">Índice de Exposição</p> $I_{Ex} = \frac{ICV+IDN+IEC}{3}$	<p style="text-align: center;">Índice de Cobertura Vegetal (ICV)</p> $ICV = \frac{ÁreaAbs+ÁreaRel}{2}$	(i) Cobertura vegetal nativa (área absoluta) (ii) Cobertura vegetal nativa (Porcentagem)	Mappiomas. Período: 1998 a 2019	
	<p style="text-align: center;">Índice de Desastres Naturais (IDN)</p> $IDN = \frac{DesNat+Exchuvav}{2}$	(i) Desastre. Naturais (porcentagem) (ii) Extremos de chuva (porcentagem)	Atlas Brasileiro de Desastres Naturais. Período: 1991 a 2012	
	<p style="text-align: center;">Índice de Exposição Costeira (IEC)</p> $IEC = \frac{Linhacosta+DCCU}{2}$	(i) Linha costeira (LC) (Quilômetros) (ii) Distancia da Costa para o Centro Urbano (DCCU) (Quilômetros)	Autor, (2019) Base cartográfica IBGE (2018)	
<p style="text-align: center;">Índice de Sensibilidade (Ise)</p> $I_{Se} = \frac{IDE+ISD}{2}$	<p style="text-align: center;">Índice de Doenças Endêmica (IDE)</p> $IDE = \frac{Dengue+Lept+Esquist}{3}$	(i) Doenças endêmica (incidência) (ii) Doença endêmica (proporção)	Secretaria de Saúde do Pará (DATASUS/SESPA) Período: 1998 a 2019	
	<p style="text-align: center;">Índice Sociodemográfico (ISD)</p> $ISD = \frac{PopAna25a+Sanland+ Mort15a+PopEconIna}{4}$	(i) População com escolaridade (Ensino fundamental incompleto e analfabeto com 25anos ou mais (proporção) (ii) Mortalidade de crianças com menos de 1 ano de vida (Taxa) (iii) Domicílios com saneamento inadequado (Taxa) (iv) População com economia inativa (Taxa)	Instituto Brasileiro de geografia e estatística. Censo 2010	
<p style="text-align: center;">Índice de Capacidade Adaptativa (ICA)</p> $ICA = \frac{IFDM+ICAB}{2}$	<p style="text-align: center;">Índice FIRJAN de desenvolvimento Municipal – IFDM</p>	(i) Resultado do IFDM	Federação da Indústria, IDHM, Ed. 2010	
	<p style="text-align: center;">Indicador de Cobertura de Atenção Básica – ICAB</p>	(i) População coberta pela atenção primária à saúde	Ministério da Saúde. (DATASUS) 2014	
	<p style="text-align: center;">Índice Climático (IC)</p> $IC = \frac{AnomTem+AnomPrp}{2}$	(i) – Anomalia de Precipitação e temperatura RCP 4.5 (ii) Anomalia de Precipitação e temperatura RCP 8.5	Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE). 2019	

Fonte: Do autor.

4.2.4 Cálculo e padronização

O cálculo dos índices envolveu três etapas: i) atribuição de pesos, ii) média aritmética e padronização e iii) combinação de índices. As variáveis, por município, foram agrupadas em cluster hierárquico (WANG; SONG, 2011) analisados no software SPSS com o método de ligação entre grupos e com o intervalo da distância euclidiana, classificados em cinco grupos, de modo que os pesos variam entre 1 e 5, onde: 1 representa o menos vulnerável e 5 o mais vulnerável. No caso dos componentes do Índice de Cobertura Vegetal (ICV), Distância da Costa para o Centro Urbano (DCCU), Índice Firjan de Desenvolvimento Municipal (IFDM) e Indicador de Cobertura da Atenção Básica (ICAB), essa lógica é inversa, pois apresentam elementos que reduzem a vulnerabilidade da população, ou seja, quanto maior os valores das variáveis, menor a vulnerabilidade, nestes casos, os pesos foram atribuídos de maneira inversa.

Posteriormente, os pesos foram agregados pela média aritmética simples para formar os subíndices. Todos os subíndices e índices foram padronizados para que apresentem a mesma faixa de 0 a 1 (0 menos vulnerável e 1 mais vulnerável), seguido a equação (1):

$$I_p = \frac{I_{obs} - \text{Mínimo } I}{\text{Máximo } I - \text{Mínimo } I}$$

Onde,

I_p = Índice padronizado

I_{obs} = Índice observado (para cada município)

Máximo I = maior valor observado entre os índices calculados

Mínimo I = menor valor observado entre os índices calculados

Todos os procedimentos de cálculos foram realizados no Excel. Deve-se observar que o índice gerado é comparativo, e sua pontuação zero não indica a ausência de vulnerabilidade, e uma pontuação 1 não significa vulnerabilidade completa, mas que de acordo com (SANTOS, 2016) as pontuações indicam o grau de vulnerabilidade de um determinado município em relação aos demais municípios da área estudada.

4.2.5 Espacialização dos dados

Os índices foram mapeados considerando às bases cartográficas municipais de acordo com IBGE (2019), e ilustrados segundo a metodologia de classificação da escala de vulnerabilidade apresentada por Freitas e Cunha (2013), onde os valores dos índices são agregados em cinco categorias muito baixa (0 – 0,19), baixa (0,20 – 0,39), média

(0,40 – 0,59), alta (0,60 – 0,79) e muito alta (0,80 – 1). Esta classificação foi atribuída ao software de sensoriamento remoto (QGIS 2.18.14) para a geração dos mapas temáticos.

4.3 Resultados

A Tabela 4.1 apresenta os valores dos índices sintéticos de cada dimensão analisada, bem como os valores padronizados de cada indicador ou variável que compuseram os referidos índices.

Tabela 1- Índices de vulnerabilidade por municípios e indicadores padronizados

Município	ICV	IDN	IEC	IEx	IDE	ISD	ISe	IFDM	ICAB	ICA	IVG	IC 4.5	IC 8.5	IVM 4.5	IVM 8.5
Afuá	0,14	0,16	1,00	0,36	0,14	0,92	0,86	1	1	1,00	1,00	1,0	1	1,00	1,00
Ananindeua	0,57	0,33	0,43	0,38	0,73	0,08	0,55	0,25	0,25	0,14	0,47	0,8	0,4	0,59	0,34
Augusto Corrêa	0,43	0,83	0,57	0,69	0,40	0,77	0,99	0,5	0	0,14	0,82	0,0	0	0,34	0,31
Barcarena	0,57	0,33	0,57	0,46	0,26	0,23	0,16	0	0,25	0,00	0,27	0,8	0,4	0,48	0,22
Belém	0,71	0	0,71	0,43	1,00	0,00	0,78	0	0,75	0,29	0,67	0,6	0,4	0,59	0,45
Benevides	0,43	0,16	0,14	0,01	0,14	0,23	0,02	0,25	0	0,00	0,00	0,8	0,4	0,33	0,06
Bragança	0,43	1	0,57	0,79	0,66	0,46	0,92	0,5	0	0,14	0,83	0,4	0	0,57	0,31
Cachoeira do Arari	0,86	0,66	0,29	0,67	0,00	0,46	0,13	0,75	1	0,86	0,74	0,6	0,6	0,63	0,61
Chaves	0,00	0,66	1,00	0,67	0,00	1,00	0,78	0,5	0,75	0,57	0,91	0,8	1	0,84	0,95
Colares	0,57	0,33	0,71	0,55	0,00	0,54	0,22	0,25	0	0,00	0,34	0,4	0,4	0,30	0,26
Curuçá	0,43	0,5	0,57	0,48	0,00	0,54	0,22	0,75	0,25	0,43	0,50	0,8	0,6	0,61	0,47
Magalhães Barata	0,43	0,33	0,43	0,29	0,00	0,54	0,22	0,5	0	0,14	0,28	0,4	0,6	0,27	0,34
Maracanã	0,43	0,33	0,57	0,38	0,07	0,54	0,30	1	0	0,43	0,49	0,2	0,2	0,27	0,23
Marapanim	0,43	0,66	0,43	0,49	0,15	0,46	0,31	0,5	0,25	0,29	0,48	0,8	0,6	0,60	0,46
Marituba	0,43	0,16	0,29	0,10	0,59	0,15	0,47	0,25	0,5	0,29	0,38	0,8	0,4	0,54	0,28
Ponta de Pedras	0,43	0,16	0,57	0,27	0,15	0,46	0,31	0,5	0,5	0,43	0,45	0,6	0,4	0,47	0,32
Primavera	0,43	0,33	0,29	0,20	0,00	0,39	0,03	0,25	0	0,00	0,09	0,2	0,2	0,05	0
Quatipuru	0,43	0,33	0,43	0,29	0,38	0,62	0,77	0,5	0,5	0,43	0,67	0,2	0,2	0,37	0,34
Salinópolis	0,43	0,33	0,71	0,47	0,13	0,23	0,00	0,25	0	0,00	0,20	0,0	0,2	0,00	0,06
Salvaterra	0,71	0,5	0,71	0,74	0,00	0,46	0,13	0,5	0,5	0,43	0,58	0,0	0,4	0,21	0,40
Santa Bárbara do Pará	0,43	0	0,29	0,00	0,07	0,39	0,11	0,25	0	0,00	0,04	0,6	0,4	0,24	0,08
Santa Cruz do Arari	1,00	0,5	0,00	0,48	0,30	0,54	0,59	0,5	0	0,14	0,54	0,6	0,6	0,52	0,49
Santo Antônio do Tauá	0,57	0,66	0,29	0,49	0,28	0,39	0,37	0,5	0	0,14	0,44	0,6	0,4	0,47	0,32
São Caetano de Odivelas	0,43	0,33	0,43	0,29	0,00	0,46	0,13	0,75	0	0,29	0,31	1,0	0,4	0,62	0,24
São João da Ponta	0,43	0,5	0,29	0,31	0,00	0,54	0,22	0,25	0	0,00	0,23	0,2	0,4	0,13	0,19
São João de Pirabas	0,43	0,33	0,71	0,47	0,13	0,62	0,47	0,5	0	0,14	0,48	0,2	0	0,27	0,11
Soure	1,00	0,33	1,00	0,99	0,26	0,46	0,44	0,5	0,5	0,43	0,84	0,4	0,4	0,58	0,55
Tracuateua	0,57	0,33	0,29	0,29	0,29	0,62	0,67	1	0	0,43	0,62	0,0	0	0,23	0,19
Vigia	0,43	0,5	0,43	0,39	0,25	0,46	0,43	0,75	0,5	0,57	0,62	0,4	0,4	0,46	0,42
Viseu	0,29	0,33	0,57	0,29	0,29	0,77	0,86	0,5	0,5	0,43	0,71	0,0	0	0,28	0,24

Fonte: Do autor.

Com o intuito de melhor compreender os resultados, os mesmos serão analisados separadamente em cada uma das dimensões i) vulnerabilidade geral, com os subíndices que o compõe e ii) índice climático e vulnerabilidade municipal, a fim de, especificar qual índice ou indicador elevou a vulnerabilidade na categoria pesquisada. Para ambos foram apresentados uma figura (mapa) com um gráfico radar apontando os cinco municípios mais vulneráveis no índice analisado.

4.3.1 Índice de Vulnerabilidade Geral – IVG e o Subíndice de Exposição Costeira (IEC)

O IVG é o resultado dos subíndices de exposição, sensibilidade e capacidade adaptativa observados para a região costeira do estado do Pará. O Índice de Exposição (IEx) apresentou uma vulnerabilidade alta e muito alta (0,67 - 0,99) nos municípios de Soure, Bragança, Salvaterra, Augusto Corrêa e Cachoeira do Arari (Figura 3A). Em Soure e Salvaterra os indicadores de cobertura vegetal (0,71 - 1) e a exposição costeira (0,71 - 1) caracterizam os municípios com vulnerabilidade alta e muito alta, respectivamente. Para Bragança e Augusto Corrêa a vulnerabilidade alta está atrelada aos indicadores de desastres naturais que apresentam os respectivos valores (0,83 - 1). Em Cachoeira do Arari, o valor do indicador de cobertura vegetal (0,84) está associado à alta vulnerabilidade do município (Figura 21A).

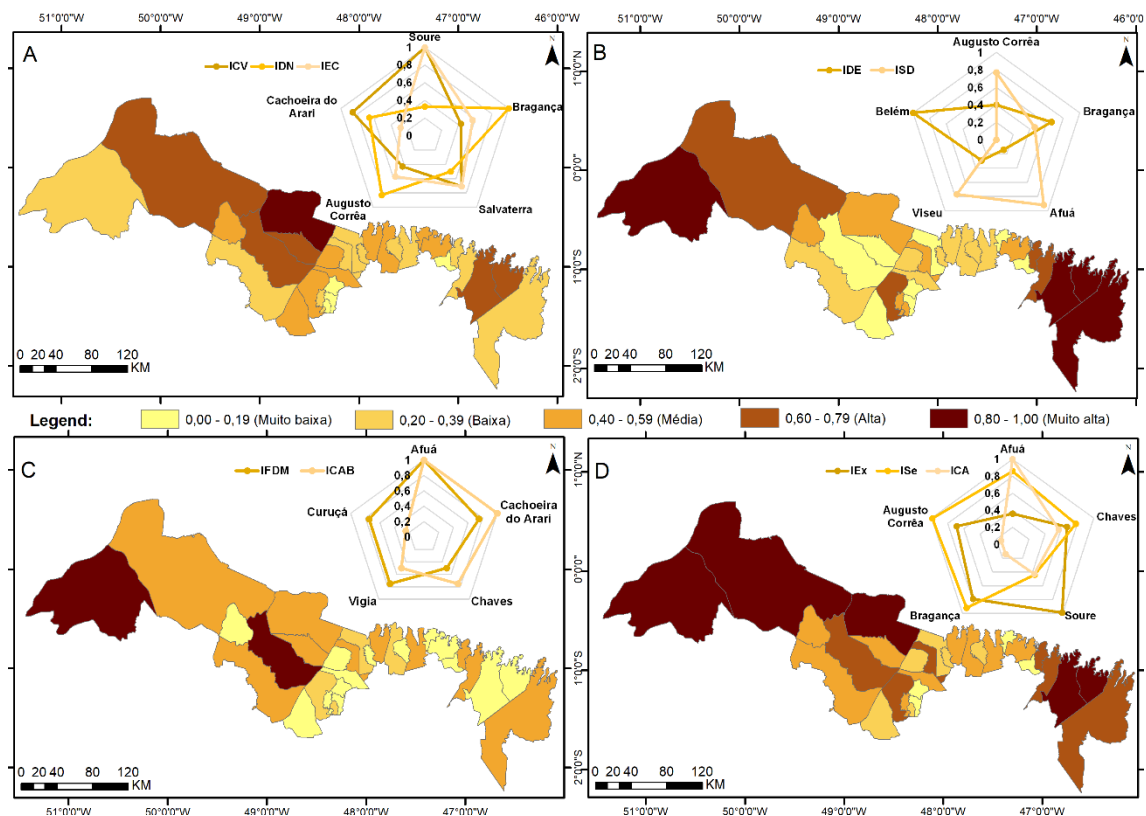
Quanto ao Índice de Sensibilidade (ISe) os municípios de Augusto Corrêa, Bragança, Afuá, Viseu e Belém apresentaram os maiores valores, elucidando uma vulnerabilidade alta e muito alta (0,78 - 0,99) (Figura 21B). Os indicadores do índice sociodemográfico nos municípios de Augusto Corrêa (0,77), Afuá (0,92) e Viseu (0,77) foram os principais responsáveis por elevar a vulnerabilidade, relacionados principalmente à expressiva quantidade de pessoas com economias inativas e analfabetas. Os maiores valores nos índices de doenças endêmicas foram encontrados para Bragança (0,66) com dados de dengue e Belém (1) com altos valores de leptospirose e esquistossomose elucidando maior vulnerabilidade a estes municípios (Figura 21B).

O Índice de Capacidade Adaptativa (ICA) que apresenta os valores dos Índice FIRJAN de desenvolvimento Municipal (IFDM) e Indicador de Cobertura de Atenção Básica (ICAB), apontou os municípios de Afuá, Cachoeira do Arari, Chaves, Vigia e Curuçá com os maiores valores (0,43 - 1) elucidando uma vulnerabilidade média a muito alta. Afuá apresentou os maiores valores para ambos índices (1) demonstrando ser o município com menor possibilidade capacidade adaptativa. Cachoeira do Arari e Chaves referenciam os maiores (ICAB) (0,75 - 1) e Vigia e Curuçá com maiores valores de (IFDM) (0,75) ambos (Figura 21C).

O Índice de Vulnerabilidade Geral (IVG) apresentou uma vulnerabilidade muita alta (0,82 - 1) para os municípios de Afuá, Chaves, Soure, Bragança e Augusto Corrêa (Figura 3D). Em Afuá o índice de capacidade adaptativa (1) foi o mais elevado. Para Chaves, Bragança e Augusto Corrêa a vulnerabilidade muito alta está associada ao índice

de sensibilidade com os valores de (0,78 – 0,92 e 0,99) respectivamente. Em Soure foi o índice de exposição (0,99) que caracterizou a vulnerabilidade municipal (Figura 21D).

Figura 21- Mapa dos: (A) Índice de Exposição, (B) Índice de Sensibilidade, (C) Índice de Capacidade Adaptativa, (D) Índice de Vulnerabilidade Geral.

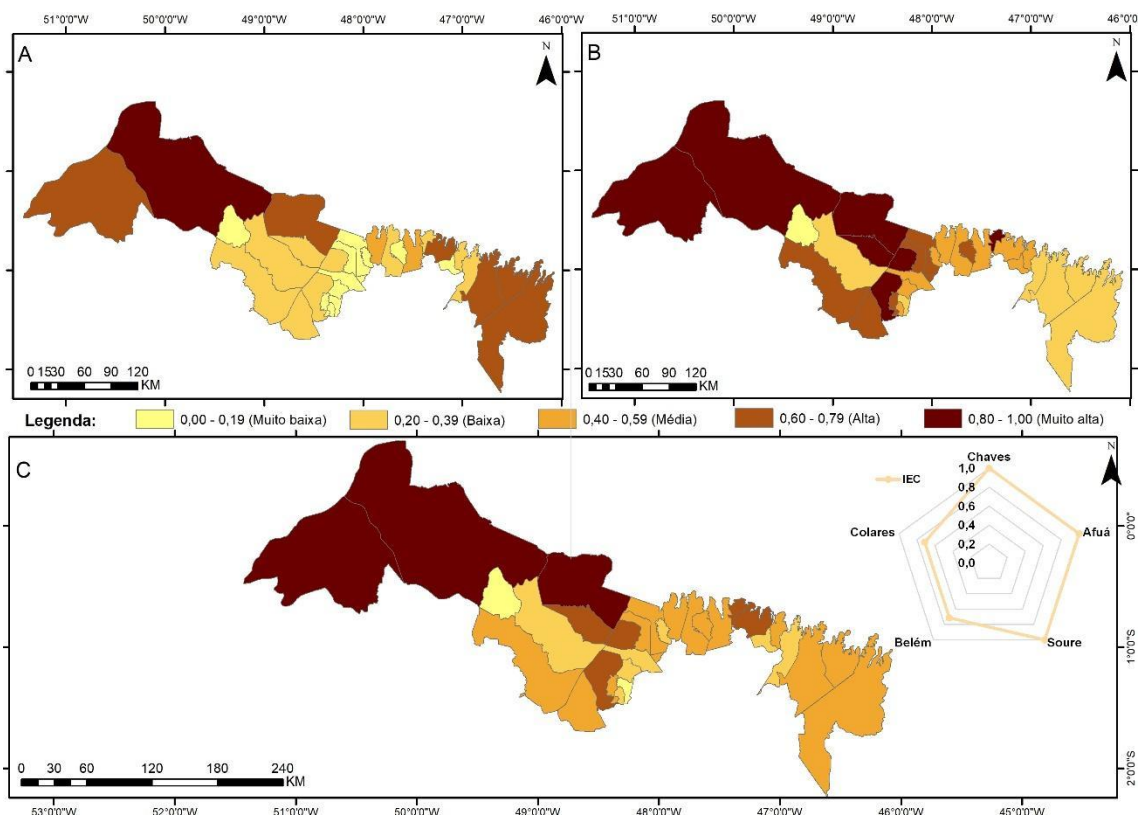


Fonte: Do autor.

O subíndice de exposição costeira (IEC), está integrado ao índice de Exposição (IEx), apresentou grande variabilidade de valores entre 0 e 1 para os municípios estudados. O IEC é formado pelos pesos atribuídos à extensão costeira dos municípios e ao distanciamento da linha costa para o centro urbano. Quando analisada a extensão costeira verificou-se alta vulnerabilidade ao município de Chaves com peso 5, compreendendo uma extensão > 283,87 Km de linha costeira. Os municípios de Afuá, Soure, Augusto Corrêa, Bragança e Viseu obtiveram peso 4 e com linhas costeiras entre 104 km e 127 km. (Figura 22A). Os municípios de Afuá, Belém, Chaves, Colares, Salinópolis, Salvaterra e Soure, apresentaram peso 5 para o distanciamento entre a linha de costa e o centro urbano, elucidando alta vulnerabilidade, seus valores foram menores que 0 km, deixando os aglomerados urbanos susceptíveis a aumento no nível do mar e a enchentes (Figura 22B).

Os mais vulneráveis quanto ao aumento do nível do mar, verificados pelo IEC foram três municípios da Ilha do Marajó (Chaves, Afuá e Soure) pois tiveram o IEC corresponde a 1 demonstrando vulnerabilidade muito alta, ambos apresentaram as maiores extensões costeira e as menores distâncias entre a linha de costa para os centros habitacionais e urbanos. Os municípios de Belém, Colares, Salinópolis e Salvaterra registraram índices com valores $> 0,71$ demonstrando alta vulnerabilidade (Figura 22C).

Figura 22- Mapa do: (A) Pesos da Extensão Costeira, (B) Peso da Distância da Costa para o Centro Urbano, (C) Índice de Exposição Costeira.



Fonte: Do autor.

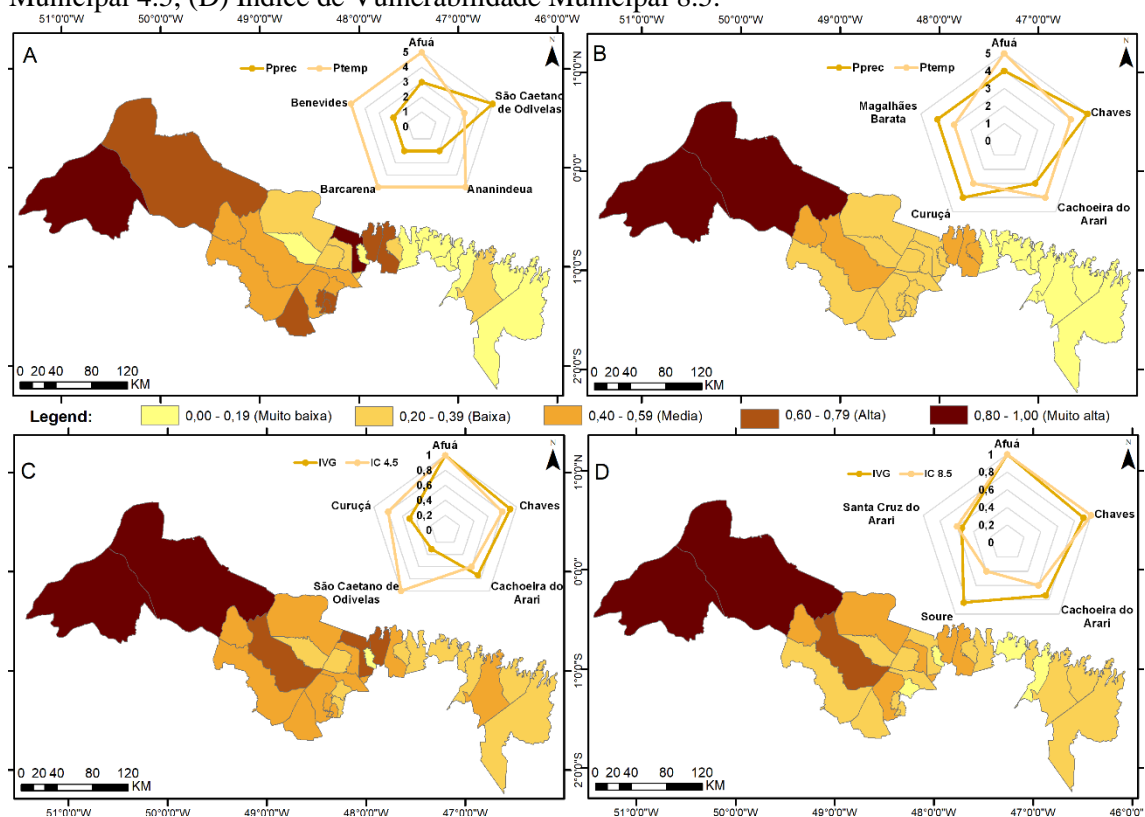
4.3.2 Índice Climático – IC e o Índice de Vulnerabilidade Municipal - IVM

O Índice Climático (IC) é resultado das anomalias de precipitação e temperatura nos cenários 4.5 e 8.5 do RCP. Quando analisado o IC no cenário 4.5 verificou-se que os municípios de Afuá, São Caetano de Odivelas, Ananindeua, Barcarena e Benevides apresentaram uma vulnerabilidade muito alta (0,8 - 1) (Figura 23A). As anomalias de temperatura com pesos de (5 e 3) foram os principais responsáveis pela alta vulnerabilidade nos municípios de Afuá (1,75C°), Ananindeua (1,74C°), Barcarena (1,78C°) e Benevides (1,75C°). Para São Caetano de Odivelas o peso da anomalia de

precipitação (5) foi a principal responsável pelo aumento da vulnerabilidade com valores máximos de 1.208mm (Figura 23A).

O Índice Climático (IC) para o cenário 8.5 apresentou os municípios de Afuá, Chaves, Cachoeira do Arari, Curuçá e Magalhães Barata com vulnerabilidade média a muito alta (0,6 - 1) (Figura 4.6B). As anomalias de precipitação com pesos (5 e 4) foram encontradas em Chaves (1004 mm), Curuçá (806 mm) e Magalhães Barata (791 mm), conferindo aos municípios a alta vulnerabilidade. Para Afuá (2,26C°) e Cachoeira do Arari (2,12C°) os pesos (5 e 4) das anomalias de temperatura foram determinantes nesse cenário para conferir a alta vulnerabilidade (Figura 23B).

Figura 23- (A) Índice Climático 4.5, (B) Índice Climático 8.5 (C) Índice de Vulnerabilidade Municipal 4.5, (D) Índice de Vulnerabilidade Municipal 8.5.



Fonte: Do autor.

O IVM é o resultado dos índices de vulnerabilidade geral (IVG) e do índice climático (IC), observados nos municípios costeiros do Pará, para os cenários 4.5 e 8.5 do RCP. No IVM durante o cenário 4,5 (Figura 23C), os municípios de Afuá, Chaves, Cachoeira do Arari, São Caetano de Odivelas e Curuçá registraram uma vulnerabilidade média a muito alta (0,61 - 1). Nos municípios de Afuá, Chaves, Cachoeira do Arari o IVG foi quem elevou a vulnerabilidade com valores de 1 – 0,91 – 0,74 respectivamente. Para São Caetano de Odivelas e Curuçá o determinante foi o IC com valores de 1 e 0,8, respectivamente (Figura 23C).

Com relação ao IVM, durante o cenário 8.5, foram observados os municípios de Afuá, Chaves, Cachoeira do Arari, Soure e Santa Cruz do Arari com vulnerabilidade média (0,49 – 0,6) a muito alta (0,8 - 1) (Figura 23D). O município de Afuá apresentou alto valor (1) para os IVG e o IC 8.5. Quando analisados o IVG os municípios de Cachoeira do Arari e Soure obtiveram os valores de 0,74 e 0,84 respectivamente, ambos determinaram a vulnerabilidade nesse cenário. Os municípios de Chaves e Santa Cruz do Arari registraram média e alta vulnerabilidade por decorrência dos valores o IC.8.5 (1 e 0,6) (Figura 23D).

4.4 Discussão

A metodologia do IVM tem sido utilizada pelos órgãos de pesquisa e administradores governamentais em vários municípios, regiões e estados brasileiros (CONFALONIERI et al., 2016; DARELA FILHO et al., 2016; DEBORTOLI et al., 2017), fornecendo uma base para a tomada de decisões, como parte das políticas públicas que visam a vulnerabilidade socioambiental a partir de uma perspectiva de mudanças climática. Todavia, o presente estudo apresenta uma nova abordagem da metodologia, aplicada pela primeira vez aos municípios costeiros do estado do Pará, considerando variáveis adaptadas para a região em estudo. O IVM apresentado associa dois cenários esperados de mudança climática e destaca o município que será potencialmente mais afetado. A avaliação do IVM contribui para o planejamento e a priorização de estratégias de adaptação climática.

O estado atual da vulnerabilidade para os municípios costeiros do estado do Pará foi identificado pelas análises do IVM, elucidando que a região investigada é afetada por pressões naturais (extremos de precipitação e grande exposição marinha) indicadas pelos altos valores de índices encontrados. A exemplo disto verifica-se a crescente retirada da cobertura vegetal, aumento no número de desastres naturais, aumento de anomalias climática e os fatores sociais como: baixa escolaridade, aumento no número doenças endêmicas – Leptospirose e Dengue, e ausência de políticas e serviços públicos, resultando em impactos significativos e à progressiva degradação dos sistemas sociais e ambientais da região costeira. Estudos de Menezes et al. (2018), Santos et al. (2019) e Vommaro, Menezes e Barata (2020) asseguram que muitos municípios de estados brasileiros, apresentam realidades semelhantes em relação aos altos valores observados para os indicadores de vulnerabilidade citados, principalmente nos estados do Amazonas,

Espírito Santo e Maranhão; assim estes indicadores podem também ser comparados a realidade dos municípios costeiros dos Pará.

No Índice de Exposição, o indicador de cobertura vegetal foi apontado como determinante para a alta e muito alta vulnerabilidade nos municípios da Ilha do Marajó (Soure, Salvaterra e Cachoeira do Arari), nesta região as principais atividades econômicas são o turismo, a pecuária bovina e bubalina e extrativismo vegetal, estas atividades podem estar interferindo no aumento do desflorestamento local e embora os municípios apresentem grandes áreas verdes, também são maiores em porção territorial o que eleva os pesos para este índice. Pesquisas de Santos et al. (2019) mostram que o baixo percentual de cobertura vegetal é também um fator agravante na vulnerabilidade dos municípios no norte do estado do Espírito Santo. A cobertura vegetal pode auxiliar na mensuração da vulnerabilidade, pois sua retirada e/ou ausência pode provocar inundações, deslizamento de terra e erosão costeira – em regiões litorâneas (DEBORTOLI et al., 2017), está é uma das variáveis utilizadas como indicador na equação apresentada por Leal Filho et al. (2018) na comparação de índice de vulnerabilidade costeira entre países.

O aspecto sociodemográfico é considerado um fator agravante à sensibilidade municipal, uma vez que populações socialmente marginalizadas (por ex. com baixa escolaridade/analfabeta, domiciliados com saneamento inadequado e população com economia inativa) encontrados em muitos municípios costeiros do estado do Pará (SILVA et al., 2018) têm maior dificuldade em se adaptar às mudanças climáticas (VOMMARO; MENEZES; BARATA, 2020). Estudos de Menezes et al. (2018) e Vommaro, Menezes e Barata (2020) apresentam que o índice de pobreza é o principal indicador de sensibilidade que eleva a vulnerabilidade nos estados do Amazonas e Maranhão. Neste estudo o índice de pobreza foi atribuído ao indicador da população economicamente inativa, registrando os maiores valores nos municípios de Chaves, Colares, Viseu, Magalhães Barata e Augusto Corrêa.

O índice de capacidade adaptativa apresenta resultados mistos, elucidando que cada município possui características diferentes na capacidade de adaptação e na formação de resiliência. Verificou-se uma maior capacidade de adaptação em municípios mais populosos, próximos a Região Metropolitana de Belém (RMB) e situados no Nordeste paraense (Belém, Barcarena, Salinópolis e Ananindeua) que tendem a ter melhor acessibilidade, infraestrutura e economia mais desenvolvida em relação aos municípios menos populosos, mais afastados da região metropolitana de Belém e situados na ilha do

Marajó (Afuá, Chaves, Soure e Salvaterra). O estudo corrobora com Pereira e Vieira (2016) que consideram a importância das organizações institucionais, da infraestrutura e da formação de capital social econômica para o enfrentamento das mudanças climáticas.

Atualmente a Região Metropolitana de Belém (RMB) se apresenta na 18ª colocação de melhor IDH das regiões metropolitanas brasileiras (IDH, 2019). A oferta de serviços de saúde, educação e a economia baseada na prestação de serviços são os principais diferenciais de Belém e Ananindeua em relação aos demais municípios da RMB podendo favorecer para diminuir a vulnerabilidade social e humana da sociedade (LIMA; MOYSÉS, 2009; PNUD, 2019). Pesquisas de (MENEZES et al., 2018; SANTOS et al., 2019 e VOMMARO; MENEZES; BARATA, 2020) utilizando metodologias semelhantes para a vulnerabilidade municipal apresentaram o Índice de Capacidade Adaptativa como um gargalo para adaptação local frente às mudanças do clima.

Analisando os cenários climáticos por meio da interpretação das anomalias observadas, as estimativas de ambos os cenários (4.5 e 8.5) apontam para uma tendência de aumento de temperatura (entre 1 °C e 3 °C) e redução da precipitação (entre 5% e 20%) para os municípios costeiros (CHOU et al. 2014; CPTEC, 2019). Essas tendências são semelhantes aos resultados encontrados nas pesquisas de (NOBRE et al., 2007; ARAÚJO JÚNIOR et al., 2013; COSTA et al., 2019) para outras escalas. No cenário 4.5 os municípios do nordeste paraense (São Caetano de Odivelas, Ananindeua, Barcarena e Benevides) foram os mais vulneráveis às anomalias de precipitação e temperatura. Todavia no cenário 8.5 os municípios do Marajó (Afuá, Chaves e Cachoeira do Arari) serão os mais afetados pelas mudanças climáticas de temperatura e precipitação. Nesta perspectiva essa pesquisa traz informações preliminares a nível local sobre a vulnerabilidade socioambiental frente às mudanças climáticas para os municípios costeiros do Estado do Pará.

Os municípios do Nordeste Paraense, apresentaram as maiores notificações de desastres naturais, de acordo com o CEPED (2019) foram mais de 30 casos registrados de alagamento e erosão somente nos municípios de Bragança e Augusto Corrêa. Os problemas decorrentes das inundações (ESPÍRITO-SANTO; SZLAFSZTEIN, 2016) e erosão nesses municípios estão associados a impermeabilização do solo, a disposição inadequada dos resíduos em vias públicas, a falta de saneamento básico em diversos setores da cidade, bem como a retirada de vegetação de encostas e margens de rios. Os municípios do nordeste paraense apresentaram uma vulnerabilidade de média a alta (0,8) para índice de exposição. Este cenário é resultado do aumento do número de extremos de

precipitação, implicados pelas mudanças climáticas e retirada da vegetação (BRITO; VEIGA, 2015; COSTA; WOLLMANN, 2016).

O litoral paraense apresenta os maiores acumulados mensais (600mm) e anuais (3300mm) de chuva, principalmente durante o primeiro semestre do ano por consequência da atuação da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) (AMANAJAS; BRAGA, 2012). As maiores anomalias de precipitação encontradas no nordeste paraense, são ratificadas com pesquisas de Souza et al. (2012) e Gomes e Fernandes (2019), que apresentaram os municípios próximos ao litoral do nordeste paraense (Marapanim, Salinópolis, Curuçá e São João de Pirabas) com os maiores acumulados e intensidade das chuvas. O aumento das anomalias ou extremos positivos e negativos de chuva serão mais frequentes dada às mudanças climáticas globais (IPCC, 2014).

O ciclo e padrões de chuva da região podem estar associados a condições locais como a retirada da cobertura vegetal e uso e ocupação da terra que interferem diretamente na promoção da convecção local (SANTOS et al., 2016). A elevada ocupação humana dos municípios costeiros fica próximo de 3.300.000 milhões de habitantes (IBGE, 2019), juntamente com o início da colonização da Amazônia pelo litoral, conferem a esta região uma modificação no uso e ocupação da terra, com retirada da vegetação e/ou desmatamento para a agricultura e desenvolvimento da pecuária extensiva. Esta mudança contribuiu para modificar o ciclo das chuvas locais (WATRIN; GERHARD, 2009).

Estudos de Szlafsztein (2003), Szlafsztein e Sterr (2007) sobre a vulnerabilidade em municípios costeiros do nordeste paraense indicam que Maracanã, Curuçá e Magalhães Barata apresentam alta vulnerabilidade e muito alta vulnerabilidade, quando investigados indicadores socioeconômicos: renda, educação economia e os naturais: topografia, cobertura vegetal, linha de costa etc., corroborando com os resultados encontrados nesta pesquisa. Todavia estes trabalhos não apresentam os municípios costeiros situados na ilha do Marajó. Os municípios de Afuá e Chaves apresentaram os maiores índices de vulnerabilidade, principalmente no que tange aos aspectos sociais: com alto percentual da população com baixa escolaridade; demográficos: elevado número de residências sem saneamento básico; e saúde: alto número de crianças que não deverão chegar a 1 ano de vida, estes resultados são similares aos de Crispim et al. (2016) para a região do Marajó e com os dados oficiais de Brasil (2007).

4.5 Conclusão

O estudo apresentou uma tentativa pioneira de análise dos aspectos da vulnerabilidade socioambiental para os municípios costeiros do estado do Pará, com inclusão de cenários de mudanças climáticas. As principais colaborações desta pesquisa são o desenvolvimento de um conjunto de indicadores adaptado à realidade dos municípios costeiros do Pará e o mapeamento da vulnerabilidade municipal a nível local a partir de uma perspectiva de mudanças do clima com inserção de dados de modelagem climática, corroborando com estudos recentes. Os resultados apontaram um primeiro passo no sentido de diminuir a vulnerabilidades dos municípios costeiros do Pará e tornar a população mais adaptadas para lidar com os impactos climáticos, a partir das seguidas medidas: fortalecer as condições de sensibilidade, melhorando as suas condições de vida, saúde e renda, pois o percentual com economia inativa e a mortalidade de crianças com menos de 1 ano de vida são os fatores que mais influenciaram a atual vulnerabilidade dos municípios.

A vulnerabilidade socioambiental frente às mudanças climáticas nos municípios costeiros do estado do Pará estão principalmente atreladas às condições de exposição, sensibilidade e capacidade adaptativa. Os cenários climáticos de anomalias de precipitação e temperatura apontaram que as mudanças do clima serão um aporte para intensificar a vulnerabilidade local. O IVM para o cenário 4.5 apresentou que os municípios do Nordeste paraense - porção leste da área de estudo - estarão mais vulneráveis às mudanças climáticas. Em contrapartida, no outro cenário 8.5 os municípios da região da ilha do Marajó - porção oeste da área pesquisada – apresentaram as maiores tendências à vulnerabilidade às mudanças do clima.

A metodologia aplicada embasou-se na construção dos índices de vulnerabilidade, por meio da análise de cluster, padronização de variáveis e média aritmética. Esta metodologia é bastante utilizada em pesquisas de mensuração de vulnerabilidade. Atualmente softwares como o Sisvulclima, otimizam os cálculos apresentados neste trabalho, mas que ainda não estão amplamente disponíveis para utilização. Concordamos que a implementação de softwares - principalmente entre as instituições de ensino e pesquisas auxiliam na avaliação da vulnerabilidade e nas propostas de adaptação para os municípios brasileiros, tornando-se, portanto, necessária sua capilarização para os diversos níveis de governança relacionados às mudanças climáticas no Brasil.

Nesse contexto, o trabalho colabora com a literatura local sobre a vulnerabilidade socioambiental na perspectiva de mudanças climáticas, visando a discussão e ampliação do tema, bem como o incentivo a futuras pesquisas com a utilização e o aperfeiçoamento do método proposto. Segundo, permitiu às gestões municipais o gerenciamento e a criação de um banco de dados sobre a atual e futura vulnerabilidade da sociedade frente às mudanças do clima. E por fim a aplicabilidade aos formuladores de políticas públicas, tentando a prevenção e minimização da vulnerabilidade socioambiental em nível local.

Referências

- ADGER, W. N. Vulnerability. **Global Environmental Change**. v. 16, n. 3, p. 268-281, 2006.
- ALMEIDA, A. F.; JARDIM, M. A. G. Mudanças socioeconômicas e ambientais resultantes das políticas públicas de desenvolvimento socioeconômico no litoral do Nordeste do Pará, Brasil. **Desenvolvimento e Meio ambiente**, v. 49, p.108-127, 2018.
- AMANAJÁS, J.C.; BRAGA, C. C. Padrões espaço-temporais pluviométricos na Amazônia Oriental usando análise multivariada. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 27, n. 4, p. 423-434, 2012.
- ARAÚJO JÚNIOR, L. M. *et al.* Análise das projeções de precipitação e temperatura do ipcc-ar5 para os cenários RCP4.5 e RCP8.5 para o século XXI para a Amazônia. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS*, 20., 2013, Bento Gonçalves-RS. **Anais[...]**.Bento Gonçalves-RS: ABRH, 2013. p. 1-8.
- BARATA, M. M. L. *et al.* Mapa de vulnerabilidade da população do Estado do Rio de Janeiro aos impactos das mudanças climáticas nas áreas social, saúde e ambiente. **Rio de Janeiro: Fiocruz**, p. 162, 2011.
- BESSAT, F. A mudança climática entre ciência, desafios e decisões: olhar geográfico. **Terra Livre**, v. 1, n. 20, p. 11-26, 2015.
- BLAIKIE, P. *et al.* **At risk**: natural hazards, people's vulnerability and disasters. 2. ed. London: Routledge, 2005.
- BRASIL. Governo Federal. **Plano de desenvolvimento territorial sustentável do Arquipélago do Marajó**. 2007. 313p. Disponível em http://bvsm.s.saude.gov.br/bvs/publicações/plano_desenv_arquipelago_marajo.pdf. Acesso em: 27 maio 2020.
- BRITO, A. L.; VEIGA, J. A. P. Um estudo observacional sobre a frequência, intensidade e climatologia de eventos extremos de chuva na Amazônia. **Ciência e Natura**, v. 37, n. 1, p. 163-169, 2015.
- CENTRO DE ESTUDOS E PESQUISAS EM ENGENHARIA E DEFESA CIVIL(CEPED). **Atlas Brasileiro de desastres naturais**. Santa Catarina, 2019. Acesso <http://www.ceped.ufsc.br/atlas-brasileiro-de-desastres-naturais-1991-a-2012> em 31 de agosto 2019.

- CHOU, S. C. *et al.* Assessment of climate change over South America under RCP 4.5 and 8.5 downscaling scenarios. **American Journal of Climate Change**, v.3, n.05, p. 512, 2014.
- CONFALONIERI, U. E. C.; MARINHO, D. P.; RODRIGUEZ, R. R. **Análise da vulnerabilidade da população brasileira aos impactos sanitários das mudanças climáticas**. Rio de Janeiro: FIOCRUZ, 2005. (Relatório final de projeto de pesquisa).
- CONFALONIERI, U. E. C. Variabilidade climática, vulnerabilidade social e saúde no Brasil, **Terra Livre**, v. 1, n. 20, p. 193-204, 2016.
- CONFALONIERI, U.E.C. *et al.* Modelo Conceitual para avaliação municipal da vulnerabilidade humana à mudança do clima no Brasil: contribuição da Fiocruz ao Plano Nacional de Adaptação. **Sumário Metodológico**, Belo Horizonte 2016. 28p. Disponível em: <http://www.sisvuclima.com.br/sobre/>. Acesso em 25 de maio de 2020.
- CONTI, J. B. Considerações sobre as mudanças climáticas globais. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 16, p. 70-75, 2005.
- COSTA, C. P. W. *et al.* Avaliação de simulação histórica da precipitação e temperatura na Amazônia oriental utilizando um modelo de alta resolução. **Revista Brasileira de Climatologia**, ano 15, v. 25, p. 612-642, jul./dez. 2019.
- COSTA, T. O.; WOLLMANN, C. A. Eventos de precipitação extrema e impacto meteórico na bacia hidrográfica do igarapé cereja, área urbana de Bragança-pa, durante o inverno amazônico de 2014. **Revista do Departamento de Geografia**, p. 51-69, 2016.
- CENTRO DE PREVISÃO DE TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS (CPTEC). **Cenários climáticos**. Disponível em: <https://projeta.cptec.inpe.br/#/dashboard>. Acesso: em 10 agosto 2019.
- CRISPIM, D. L. *et al.* Espacialização da cobertura do serviço de saneamento básico e do índice de desenvolvimento humano dos municípios do Marajó, Pará. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v.11, n.4, p. 112-122, 2016.
- DANTAS, M. E. *et al.* Origem das paisagens. In: BRANDÃO, Ricardo de Lima; FREITAS, Luis Carlos Bastos (org.). **Geodiversidade do Estado do Ceará**. Fortaleza, Brasil, 2014. cap. 2.2, p. 35-60.
- DARELA FILHO, J. P. *et al.* Socio-climatic hotspots in Brazil: how do changes driven by the new set of IPCC climatic projections affect their relevance for policy? **Climatic Change**, v. 136, n.3-4, p.413-425, 2016.
- DEBORTOLI, N. S. *et al.* An index of Brazil's vulnerability to expected increases in natural flash flooding and landslide disasters in the context of climate change. **Natural Hazards**, v.86, n.2, p.557-582, 2017.
- ESPÍRITO-SANTO, C. M.; SZLAFSZTEIN, C. F. Gestão de risco de desastres em planos diretores de três municípios da zona costeira do estado do Pará, Brasil. **Revista de Gestão Costeira Integrada**, v. 16, n. 2, p. 223-229, 2016.
- FREITAS, M. I. C; CUNHA, L. Cartografia da vulnerabilidade socioambiental: convergências e divergências a partir de algumas experiências em Portugal e no Brasil. **Revista Brasileira de Gestão Urbana**, v.5, n.1, p. 15-31, 2013.

FUNDAÇÃO OSWALDO CRUZ (FIOCRUZ). **Manual sistema de vulnerabilidade climática, Sisvuclima**. Rio de Janeiro, Brasil, 2016. Acessado <http://www.sisvuclima.com.br/> em 25/10/2019.

GOMES, A. B. B.; FERNANDES, L. L. Estudo do regime pluviométrico da microrregião do salgado no estado do Pará. **Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales. Investigación, Desarrollo y Práctica**, v. 12, n. 2, p. 295-312. 2019.

GUPTA, A. K. *et al.* Mapping socio-environmental vulnerability to climate change in different altitude zones in the Indian Himalayas. **Ecological Indicators**, v.109, p.105787, 2020.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Estimativas populacionais dos municípios**. Disponível <https://cidades.ibge.gov.br/>. Acesso em 29 de novembro de 2019.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Manual técnico de geomorfologia**. 2. ed., Rio de Janeiro, 2009. 175 p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Manual técnico da vegetação brasileira**. 2. ed., Rio de Janeiro, 2012. 271 p.

ÍNDICE DE DESENVOLVIMENTO HUMANO MUNICIPAL (IDHM). **Ranking IDHM Municípios 2010**. Disponível em <https://www.firjan.com.br/ifdm/>. Acessado em 05/03/2019

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). “Intergovernmental Panel on Climate Change,” in *Climate Change 2014: Synthesis Report*. In: PACHAURI, R. K.; MEYER, L. A. (eds). **Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Geneva, Switzerland: IPCC, 2014. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>. Acesso em: 25 de novembro de 2019.

IWAMA, A. Y.; BATISTELLA, M.; FERREIRA, L. D. C. Riscos geotécnicos e vulnerabilidade social em zonas costeiras: desigualdades e mudanças climáticas. **Ambiente & Sociedade**, v.17, n.4, p.251-274, 2014.

LIMA, J.; MOYSÉS, A. (org.). **Como andam Belém e Goiânia**. Rio de Janeiro: Letra Capital: Observatório das Metrôpoles, 2009. v. 11.

LEAL FILHO, W. *et al.* Fostering coastal resilience to climate change vulnerability in Bangladesh, Brazil, Cameroon and Uruguay: a cross-country comparison. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**, v.23, n.4, p.579-602, 2018.

MACHLIS, G. E.; FORCE, J. E.; BURCH JR, W. R. The human ecosystem part I: the human ecosystem as an organizing concept in ecosystem management. **Society & Natural Resources**, v.10, n.4, p.347-367, 1997.

MAIOR, M. M. S.; CÂNDIDO, G. A. Avaliação das metodologias brasileiras de vulnerabilidade socioambiental como decorrência da problemática urbana no Brasil. **Caderno Metropolitano**, v. 16, n. 31, p. 241-264, 2014.

MAVROMATIDI, A.; BRICHE, E.; CLAEYS, C. Mapping and analyzing socio-environmental vulnerability to coastal hazards induced by climate change: An application to coastal Mediterranean cities in France. **Cities**, v. 72, p.189-200, 2018.

MAPBIOMAS. **Mapeamento anual da cobertura e uso do solo do Brasil**. Disponível em: <https://mapbiomas.org/estatisticas>. Acesso em 25 de março de 2019.

MENEZES, J. A. *et al.* Mapping human vulnerability to climate change in the Brazilian Amazon: the construction of a municipal vulnerability index. **PloS one**, v.13, n.2, e0190808, 2018.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Municípios costeiros do Estado do Pará**. Disponível em <https://www.mma.gov.br/informma/item/10592-lista-munic%C3%ADpios-da-zona-costeira.html> Acesso em: 20 janeiro 2020.

NEVES, C. F.; MUEHE, D. Vulnerabilidade, impactos e adaptação a mudanças do clima: a zona costeira. **Parcerias Estratégicas**, v. 13, n. 27, p. 217-296, 2010.

NOBRE, C. A.; SAMPAIO, G.; SALAZAR, L. Mudanças climáticas e Amazônia. **Ciência e Cultura**, v. 59, n. 3, p. 22-27, 2007.

O'BRIEN, K. A. R. E. N. *et al.* Why different interpretations of vulnerability matter in climate change discourses. **Climate policy**, v.7, n.1, p. 73-88, 2011

OJIMA, R.; MARANDOLA JR, E. **Mudanças climáticas e as cidades: novos e antigos debates na busca da sustentabilidade urbana e social**. [S.l.]: Editora Blucher, 2013.

PEREIRA, F. S.; VIEIRA, I. C. G. Expansão urbana da Região Metropolitana de Belém sob a ótica de um sistema de índices de sustentabilidade. **Revista Ambiente & Água**, v. 11, n. 3, p. 731-744, 2016.

PEREIRA, L. C. C. *et al.* A zona costeira amazônica brasileira. **Revista de Gestão Costeira Integrada-Journal of Integrated Coastal Zone Management**, v. 9, n. 2, p. 3-7, 2009.

POLÍTICA BRASILEIRA DE MUDANÇAS CLIMÁTICA (PBMC). Impacto, vulnerabilidade e adaptação das cidades costeiras brasileiras às mudanças climáticas. *In* MARENGO, J.A.; SCARANO, F.R. (eds.). **Relatório especial do painel brasileiro de mudanças climáticas**. Rio de Janeiro, Brasil: PBMC, COPPE – UFRJ, 2016. 184 p. ISBN: 978-85-285-0345-6.

PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO (PNUD). **Atlas do desenvolvimento humano no Brasil**. PNUD. Disponível em: <https://www.br.undp.org/content/brazil/pt/home/idh0/rankings/idhm-municipios-2010>. Acesso em: 20/11/2019.

QUINTÃO, A. F. *et al.* Social, environmental, and health vulnerability to climate change: the case of the municipalities of Minas Gerais, Brazil. **Journal of Environmental and Public Health**, ID 2821343, Mar. 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/2821343>.

RIBEIRO, W. C. Impactos das mudanças climáticas em cidades no Brasil. **Parcerias Estratégicas**, v. 13, n. 27, p. 297-322, 2010.

RODRIGUES, J. C.; CASTRO, E. M. R. Companhia Docas do Pará (CDP): plataforma logística do capital internacional na Amazônia Oriental. **Contribuciones a las Ciencias Sociales**, v.20, p.1-14, 2013.

SANTOS, M. R.; VITORINO, M. I.; PIMENTEL, M. A. da S. Vulnerabilidade e mudanças climáticas: análise socioambiental em uma mesorregião da Amazônia. **Revista Ambiente & Água**, v.12, n.5, p. 842-854, 2017.

SANTOS, M. R. S. *et al.* Padrões de precipitação mensal na mesorregião metropolitana de Belém: uso do CMORPH e componentes principais. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.9, n.7, p.2301-2311, 2016.

SANTOS, R.B. dos. **Vulnerabilidade socioambiental e de saúde dos municípios do Estado do Espírito Santo frente aos impactos das mudanças climáticas**. 2016. 168 f. Dissertação (Mestrado em Saúde Coletiva, concentração em Epidemiologia) - Programa de Pós-Graduação em Saúde Coletiva, Centro de Pesquisas René Rachou, Fundação Oswaldo Cruz, Belo Horizonte, 2016.

SANTOS, R. B. dos. *et al.* Construção e aplicação de um índice de vulnerabilidade humana à mudança do clima para o contexto brasileiro: a experiência do estado do Espírito Santo. **Saúde e Sociedade**, v. 28, p. 299-321, 2019.

SCHUMANN, L. R. M. A.; MOURA, L. B. A. Índices sintéticos de vulnerabilidade: uma revisão integrativa de literatura. **Ciência & Saúde Coletiva**, v.20, p.2105-2120, 2015.

SILVA, D. F. *et al.* Análise da relação entre esgotamento sanitário, idh e mortalidade infantil no estado do Pará. **Caderno de Pesquisa, Ciência e Inovação**, v.1, n.3, Cap. 2, p. 23-30, 2018.

SOUZA, E. B. *et al.* Padrões climatológicos e tendências da precipitação nos regimes chuvoso e seco da Amazônia oriental. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 21, p. 81 - 93, 2017.

SOUZA, R. O. D. M. *et al.* Equações de chuvas intensas para o estado do Pará. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, n.9, p. 999-1005, 2012.

SOUZA FILHO, P.W.M.e. Impactos naturais e antrópicos na planície costeira de Bragança (NE do Pará). *In*: PROST, M.-T.; MENDES, A. C. **Ecossistemas costeiros, impactos e gestão ambiental**. Belém: MPEG, 2001. p. 113-125.

SZLAFSZTEIN, C. F. **Vulnerability and response measures to natural hazard and sea level rise impacts**: long-term coastal zone management, NE of the State of Pará, Brazil. 2003. xvii, 185+ 5 f. Tese (Doutorado) - Christian-Albrechts Universität Kiel, 2003.

SZLAFSZTEIN, C.; STERR, H. A GIS-based vulnerability assessment of coastal natural hazard, state of Pará, Brazil. **Journal of Coastal Conservation**. v.11, n.1, p, 53-66, 2007.

SZLAFSZTEIN, C.; STERR, H. Coastal zone management tool: a GIS-based vulnerability assessment to natural hazards. *In*: SAINT PAUL, U.; SCHNEIDER, H. (orgs.). **Mangrove dynamics and management in North Brazil**, Berlin: Springer-Verlag, Heidelberg, Alemanha, 2010.

TIBÚRCIO, L. H.; CORRÊA, M. D. P. Análise da vulnerabilidade da microrregião de Itajubá por meio do IVG com vistas à mitigação dos impactos causados pelas mudanças climáticas. **Ambiente e Sociedade**, v. 15, n. 3, p. 123-139, 2012.

VOMMARO, F.; MENEZES, J. A.; BARATA, M.de L. Contributions of municipal vulnerability map of the population of the state of Maranhão (Brazil) to the sustainable development goals. **Science of The Total Environment**, v. 706, p. 134629, 2020.

VAN VUUREN, D. P. *et al.* The representative concentration pathways: An overview. **Climate Change**, v. 109, n. 1-2, p. 5-31, 2011.

WANG, H.; SONG, M. CKmeans.1d.dp: Optimal k-means clustering in one dimension by dynamic programming. **The R. Journal**, Ohio, v. 3, n. 2, p. 29-33, 2011.

WATRIN, O. D. S.; GERHARD, P.; MACIEL, M. Dinâmica do uso da terra e configuração da paisagem em antigas áreas de colonização de base econômica familiar, no Nordeste do estado do Pará. **Geografia**, v. 34, n. 3, p. 455-472, 2009.

ZANELLA, M. E. *et al.* Vulnerabilidade socioambiental do baixo curso da bacia hidrográfica do Rio Cocó, Fortaleza-CE. **Sociedade & Natureza**, v.25, n.2, p.317-331, 2013.

ZANETTI, V. B.; SOUSA JUNIOR, W. C. de; FREITAS, D. M. de. A climate change vulnerability index and case study in a Brazilian coastal city. **Sustainability**, v.8, n.8, p. 811, 2016.

5 CONCLUSÃO GERAL

5.1 Principais resultados – Síntese

A tese apresenta por meio dos métodos utilizados, que as mudanças e variações climáticas influenciam nas variáveis sociais e ambientais ao longo da região costeira da Amazônia, contribuindo para a ciência local sobre o tema. Confirma-se a hipótese principal do estudo onde as mudanças climáticas afetam negativamente as sociedades locais com maior variação entre os elementos físicos e naturais envolvidos. Esta afirmação é provada pelos resultados alcançados nos objetivos específicos da pesquisa.

A variabilidade espaço-temporal da precipitação mostrada nos diferentes tempos e os padrões de chuva obtiveram respostas satisfatórias quando a utilização dos dados de sensoriamento remoto (CMORPH) e a aplicação da Análise de Componentes Principais (ACP). Essa eficácia é corroborada pela comparação dos quantitativos da chuva apresentados nas estações de superfície e nos acumulados que mostram a sazonalidade local. A ACP apresentou a existência de dois modos pluviométricos com 88% da variância total dos dados. O primeiro modo, com 83%, elucidando o período: chuvoso e menos chuvoso da região, com a atuação dos sistemas precipitantes de grande escala. O segundo modo, com 5% de explicação, está associado à ocorrência de sistemas de mesoescala. Estes resultados confirmam em parte a hipótese desse objetivo, conhecendo em primeira vez a variabilidade espaço temporal da precipitação por meio de sensoriamento remoto em alta resolução (CMORPH – 8 KM/30min) para a região costeira da Amazônia, todavia não consegue afirmar que há uma variabilidade diferente na precipitação em anos de extremos climáticos, pelo menos não em grande escala, pois já é sabido da literatura que há aumento no quantitativo de chuva durante a La Niña e redução durante o El Niño, validando apenas que os extremos tendem a ser mais extremos.

Os acumulados estimados pelos dados de sensoriamento remoto (CMORPH) superestimam em 3,7% as chuvas quando comparada aos acumulados pela estação meteorológica de superfície. Os dados do CMORPH são mais superestimados durante anos Típicos e de La Niña e menores em anos considerados Seco ou El Niño. Os resultados evidenciam que as variáveis físicas (precipitação e maré) são as principais moduladoras das variáveis hidrológicas (salinidade, clorofila-a e turbidez), elucidando também uma relação inversa entre a precipitação e salinidade para as três áreas de estudo. As águas foram mais salinas, com menores concentrações de clorofila e menos turvas no

final do segundo semestre do ano, principalmente durante os anos de Seco (2013) e El Niño (2015 e 2016). Os menores valores de salinidade foram durante o primeiro semestre, também se registrou águas mais concentradas em clorofila-a e mais turvas durante anos típicos e evento La Niña. Confirma-se a hipótese que as variáveis físicas modulam a hidrologia local, com maior interferência durante anos a ocorrência de extremos negativos de chuva o que acontece em anos Seco e El Niño.

Quando a vulnerabilidade atual está relacionada às projeções futuras de mudanças climáticas verifica-se que os municípios mais vulneráveis estão na região da Ilha do Marajó – oeste da área de estudo, onde o IVM varia entre 1 (Afuá) e 0,55 (Soure) para os cenários 4.5 e 8.5, respectivamente. Os resultados mostraram que o Índice de Sensibilidade (ISe) e o Índice Sociodemográfico (ISd) apontaram a maior influência na vulnerabilidade atual dos municípios. A hipótese de que os cenários climáticos interferem na vulnerabilidade socioambiental dos municípios costeiros do Pará, elevando sua vulnerabilidade de forma heterogênea no espaço é confirmada, uma vez que quando maior for as mudanças do clima (com redução de precipitação e aumento de temperatura) explicitará a vulnerabilidade socioambiental dos municípios costeiros apontando a desigualdade dos municípios marajoara.

5.2 Impactos e implicações

Os resultados desta pesquisa permitem que o poder público, tenha aporte científico para as diferentes fases do processo de planejamento e execução das políticas públicas municipais, baseadas na gestão compartilhada, descentralizada e participativa, no que tange a busca pelo desenvolvimento local e solução dos problemas socioeconômicos e ambientais. Acredita -se ainda que estes resultados possam contribuir para a adoção efetivas de medidas governamentais, priorizando os municípios mais vulneráveis e preparando-os para lidar com os aspectos adversos das mudanças do clima.

Para o setor privado, aponta de forma clara que há possibilidade de fortes investimentos tecnológicos e civis no que compete a infraestrutura de municípios e serviços básicos de saúde para a sociedade, principalmente para os entes federados mais afastados na região metropolitana de Belém. E o ganho para a comunidade em geral, torna-se mais evidente como um ponto de referência para a discussão do modelo de desenvolvimento socioeconômico e ambiental, haja vista amplia a discussão do tema, contribuindo também para o aporte científico local.

As contribuições ao Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais (PPGCA/UFGA) e Programa de Pós-graduação em Biologia Ambiental (PPGBA/UFGA) dá-se a partir do conhecimento técnico-científico produzido sobre a região costeira amazônica e paraense, corroborando com pesquisas desta área e encorajando aos pesquisadores a utilização de dados de sensoriamento remoto, dada as transformações nas relações sociais e ambientais atuais voltadas ao fomento, desenvolvimento socioeconômico e, a conservação dos ecossistemas costeiros.

5.3 Lacunas e perspectiva futura

Esta pesquisa cumpre aqui seus objetivos, no entanto deixa a outros pesquisadores diversas indagações para o aperfeiçoamento metodológico. A começar no capítulo 2 quando poderá ser analisado apenas os anos de extremos climáticos, conferindo ao pesquisador a possibilidade de contabilizar estatisticamente a diferença entre os dados de superfície da estação meteorológica e outras fontes remotas de precipitação (ex: CHIPS) com maior resolução espacial (4 km). Para o capítulo 3, inclui-se a utilização de dados hidrológicos por meio de sensoriamento remoto, uma vez que os dados oriundos de coletas de campo, são essenciais, porém escassos para correlações contínuas no tempo e espaço.

No capítulo 4, espera-se a inclusão de dados de erosão costeira, uma vez que é esperado o avanço das águas marinhas sobre o continente. Assim espera-se que o método seja aperfeiçoado quando a sua modelagem e também a sistematização de um programa automatizado dos dados (ex: SISVULCLIMA). De modo geral recomenda-se que os investimentos futuros na região costeira levem em consideração a vulnerabilidade social e ambiental destes espaços, em resposta às variações e mudanças climáticas.

REFERÊNCIAS

- AB'SABER, A. N. Um conceito de geomorfologia a serviço das pesquisas sobre o quaternário, **Geomorfologia**, São Paulo, n. 18, p. 1-23, 1969.
- ADGER, W.N. Vulnerability. **Global Environmental Change**, v.16, n.3, p.268-281, 2006.
- ALMEIDA, A. F.; JARDIM, M. A. G. Mudanças socioeconômicas e ambientais resultantes das políticas públicas de desenvolvimento socioeconômico no litoral do Nordeste do Pará, Brasil. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, v. 49, p. 108-129, dez. 2018.
- ALMEIDA, A. F.; JARDIM, M. A. Atuação da comunidade local nas políticas públicas de desenvolvimento socioeconômico e ambiental. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 12, n. 5, p. 1823-1834, 2019.
- ALMEIDA, L. Q. **Vulnerabilidade socioambiental de rios urbanos**: bacia hidrográfica do Rio Maranguapinho região metropolitana de Fortaleza-Ceará. 2010. 278 f. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2010.
- ALBUQUERQUE, M. F. *et al.* Precipitação nas mesorregiões do estado do Pará: climatologia, variabilidade e tendências nas últimas décadas (1978-2008). **Revista Brasileira de Climatologia**, v.6, n.6, p. 151-166, 2010.
- AMANAJÁS, J. C.; BRAGA, C. C. Padrões Espaço-Temporal Pluviométricos na Amazônia Oriental utilizando Análise Multivariada. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 27, n.4, p. 423-434, 2012.
- BARBOSA, G. V.; PINTO, M. N. Geomorfologia da Folha SA-23 (São Luís) e parte da Folha SA- 24 (Fortaleza). *In*: BRASIL. **Projeto Radam Brasil**. Rio de Janeiro, 1973. cap.2, p. 3-26. (Levantamento de Recursos Naturais, v. 21).
- BECKER, B. K. Revisão das políticas de ocupação da Amazônia: é possível identificar modelos para projetar cenários?. **Parcerias Estratégicas**, v. 6, n. 12, p. 135-159, 2010.
- BLAIKIE, P. M.; CANNON, T.; DAVIS, I.; WISNER, B. **Atrisk**: natural hazards, people's vulnerability, and disasters. London: Routledge. 1994.
- BRAGA, R. da C; PIMENTEL, M. A. da S.; ROCHA, Edson José Paulino. Mudanças Climáticas e Impactos da Elevação do Nível do Mar na Zona Costeira: Pesquisa Bibliográfica e Contribuição Conceitual. **Fronteiras: Journal of Social, Technological and Environmental Science**, v.9, n.1, p. 230-255, 2020.
- BRASIL. Plano Plurianual de Governo – PPA Programa mudanças climáticas. **Análise da vulnerabilidade da população brasileira aos impactos sanitários das mudanças climáticas**. Brasília, DF, 2005.

BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Censo demográfico e estimativas**. Brasília, DF, 2010. Disponível em: <https://censo2010.ibge.gov.br/noticias-censo.html?busca=1&id=1&idnoticia=2036&t=ibge-parceria-marinha-brasil-lanca-atlas-geografico-zonas-costeiras-oceanicas&view=noticia>. Acesso em: 31 agosto. 2018.

BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Censo demográfico e estimativas**. Brasília, DF, 2017. Disponível em: <http://www.cidades.ibge.gov.br/>. Acesso em: 30 agosto. 2018.

BRASIL. **Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade**. Brasília, DF, 2018. Disponível em: <http://www.icmbio.gov.br/portal/unidadesdeconservacao/biomas-brasileiros/amazonia/unidades-de-conservacao-amazonia>. Acesso em: 30 agosto de 2018.

BRASIL. **Lei nº 12.651**, de 25 de maio de 2012. Disponível: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/112651.htm. Acesso em 25/01/2021.

BRASIL. **Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro**. Lei 7.661, de 16/05/1988. Disponível em: [http:// https://www.marinha.mil.br/secirm/gerco](http://https://www.marinha.mil.br/secirm/gerco). Acesso em: 30 agosto de 2020.

CARMO, R.L. Urbanização e desastres: desafios para a segurança humana no Brasil. *In*: CARMO, R.L.; VALENCIO, N. (org.). **Segurança humana em contextos de desastres**. 1ed. São Carlos: Editora Rima, 2014. p.1-14.

CHHABRA, A.; GEIST, H. Multiple Impacts of Land-Use/Cover Change. *In*: LAMBIN, E. F.; GEIST, H. (orgs.) **Land-Use and land-cover change: local processes and global impacts**. New York: Springer Berlin Heidelberg, 2006, p.71-116.

COMISSÃO INTERMINISTERIAL PARA A PREPARAÇÃO DA CONFERÊNCIA DAS NAÇÕES UNIDAS SOBRE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO (CIMA). **Subsídios técnicos para a elaboração do relatório nacional do Brasil para a CNUMAD** (conferência das Nações Unidas sobre meio ambiente e desenvolvimento). Versão preliminar. Brasília, DF, 1991.

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**, Boston, v. 123, n.11, p. 3163-3174, 1995.

COSTA, J. L. *et al.* **Projeto Gurupi**. v.1. Belém: DNPM/CPRM. 1977. 258 p. (Relatório Final).

CONFALONIERI, U. E. C.; MARINHO, D. P.; RODRIGUEZ, R. E. Public Health Vulnerability to Climate Change in Brazil, **Climate Research**, v.40, p.175-186, 2009.

CERRI, L.E.S.; AMARAL, C.P. Riscos geológicos. *In*: OLIVEIRA, A.M.S.; BRITO, S.N.A. (eds.). **Geologia de engenharia**. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE), 1998. cap. 18, p.301-310.

CORRÊA, J. A. de J.; COSTA, A. C. L. da; PEREIRA, I. C. N. Associação entre a precipitação pluviométrica e a incidência de dengue em sete municípios do estado do Pará. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 9, n. 07, p. 2264-2276, 2016.

CUTTER, S. L. Vulnerability to environmental hazards. **Human Geography**, v. 20, n. 4, p. 529-539, 1996.

CUTTER, S.L.; BORUFF, B.J.; SHIRLEY, W.L. Social Vulnerability to Environmental Hazards. **Social Science Quarterly**, v.84, n.2, p. 243-261, 2003.

D'ERCOLE, R. Les vulnérabilités des sociétés et des espaces urbanisés: concepts, typologie, modes d'analyse. **Revue de Géographie Alpine**. Paris, v. 82, n. 4, p. 87-96, 1994.

DESCHAMPS, M, V. **Vulnerabilidade socioambiental nas regiões metropolitanas brasileiras**. Brasília,DF: Convênio Ministério das Cidades/ Observatório das Metrôpoles/Fase/Ipardes, 2006. (Relatório de atividades do Observatório das Metrôpoles).

DYER, K. R. **Sediment transport processes in estuaries**. [S.l.]: Elsevier, 1995. p. 423-449. (Developments in Sedimentology, 53).

EL-ROBRINI, M. *et al.* Panorama da erosão costeira—Pará. *In*: MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Panorama da erosão costeira no Brasil**. [Recurso eletrônico]. Brasília, DF, 2018. p. 67-165.

ESPIRITO-SANTO, C. M.; SZLAFSZTEIN, C. F. Gestão de risco de desastres em planos diretores de três municípios da zona costeira do estado do Pará, Brasil. **Revista de Gestão Costeira Integrada**, v. 16, n. 2, p. 223-229, 2016.

GERMANO, M. F. *et al.* Analysis of the breeze circulations in Eastern Amazon: an observational study. **Atmospheric Science Letters**, v.18, n.2, p.676-75, 2017.

GEYER, W.R. *et al.* Physical oceanography of the Amazon Shelf. **Continental Shelf Research**, v.16, p.575-616, 1996.

GOMES, E. J. S.; BATISTA, I. S.; LIMA, Z. M. C. Cobertura, ocupação do solo e erosão no entorno da laguna Guaraíras/RN, Brasil. **Holos**, v. 34, n. 1, p. 140-156, 2018.

GOMES, R. K. S. *et al.* Dinâmica socioambiental em uma comunidade pesqueira amazônica, PA-Brasil. **Revista de Gestão Costeira Integrada-Journal of Integrated Coastal Zone Management**, v. 9, n. 2, p. 101-111,2009.

GONÇALVES, N. V. *et al.* Distribuição espaço-temporal da leptospirose e fatores de risco em Belém, Pará, Brasil. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 21, p. 3947-3955, 2016.

HOGAN, D. J. *et al.* Urbanização e vulnerabilidades socioambientais diferenciadas: o caso de Campinas. *In: ENCONTRO NACIONAL DE ESTUDOS POPULACIONAIS*, 12., 2016, **Anais[...]**. 2016. p. 1-25. Disponível em: <http://www.abep.org.br/publicacoes/index.php/anais/article/viewFile/994/959>. Acesso em: 15 de novembro de 2019.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Estimativas da População**, 2014. 1 jul. 2014.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Estimativas populacionais dos municípios**. Disponível <https://cidades.ibge.gov.br/>. Acesso em 29 de novembro de 2019.

IWAMA, A. Y.; BATISTELLA, M.; FERREIRA, L. D. C. Riscos geotécnicos e vulnerabilidade social em zonas costeiras: desigualdades e mudanças climáticas. **Ambiente & Sociedade**, v.17, n.4, p.251-274, 2014.

LACERDA, L. D.; SCHAEFFER-NOVELLI, Y. Latin American Mangroves: the need for sustainable utilization. **Mangroves Newsletter**, v. 5, p. 4-6, 1992. Lewis Publishers, 1995. 240 p.

LIVERMAN, D.M. Vulnerability to global environmental change. *In: KASPERSON, J.X.; KASPERSON, R.E. (eds.). Global environmental risk. Earthscan and United Nations*. London: UniversityPress, 2001.

MAIOR, M. M. S.; CÂNDIDO, G. A. Avaliação das metodologias brasileiras de vulnerabilidade socioambiental como decorrência da problemática urbana no Brasil. **Caderno Metropolitano**, São Paulo, v.16, n.31, p.241-264, 2014.

MARENGO, J. A. On the hydrological cycle of the Amazon basin: ahistorical review and current State-of-the-art. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.21, n.3, p. 01-19, 2006.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Municípios costeiros do Estado do Pará**. Disponível em <https://www.mma.gov.br/informma/item/10592-lista-munic%C3%ADpios-da-zona-costeira.html> Acesso em: 20 janeiro 2020.

MOLION, L. C. B. Amazonian rainfall and its variability. *In: BONELL, Michael et al. (ed.). Hydrological and water management in the humid tropics*. Cambridge: Cambridge University press, 1993. p.99–111.

MOLION, L.C.B. Climatologia dinâmica da região amazônica: mecanismos de precipitação. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 2, p.107- 117, 1987.

MORAES, B. C. *et al.* Variação espacial e temporal da precipitação no estado do Pará. **Acta Amazônica**, v. 35, p. 207-217, 2005.

NEVES, C. F.; MUEHE, D. Vulnerabilidade, impactos e adaptação a mudanças do clima: a zona costeira. **Parcerias Estratégicas**, v. 13, n. 27, p. 217-296, 2010.

O'BRIEN, K.L. *et al.* **What's in a word? Conflicting interpretations of vulnerability in climate change research**. Oslo, Norway: CICERO Working Paper, 2004, 16p.

O'BRIEN, K.L. *et al.* A. Why different interpretations of vulnerability matter in climate change discourses. **Climate Policy**, v.7, n.1, p.73-88, 2013.

PEREIRA, F. da S.; VIEIRA, I. C. G. Expansão urbana da Região Metropolitana de Belém sob a ótica de um sistema de índices de sustentabilidade. **Revista Ambiente & Água**, v. 11, n. 3, p. 731-744, 2016.

PEREIRA, L. C. C.; DIAS, J. A.; CARMO, J. A. do; POLETTE, M. A zona costeira amazônica brasileira. **Journal of Integrated Coastal Zone Management**, v. 9, n.2, p. 3-7, 2009.

PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO (PNUD). **Atlas do desenvolvimento humano no Brasil**. Acesso PNUD <https://www.br.undp.org/content/brazil/pt/home/idh0/rankings/idhm-municipios-2010> em 20/11/2019.

QUINTÃO, A. F. *et al.* Social, environmental, and health vulnerability to climate change: the case of the municipalities of Minas Gerais, Brazil. **Journal of Environmental and Public Health**, ID 2821343, 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/2821343> 2017.

REBOITA, M. S.; SANTOS, I. Influência de alguns padrões de teleconexão na precipitação no norte e nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, v.15, p.28-48, 2015.

REES, W. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: what urban economies leaves out. **Environment and Urbanization**, v. 4, n. 2, p. 121-130, 1992.

REZENDE, T. V. F. **A conquista e a ocupação da Amazônia brasileira no período colonial: a definição das fronteiras**. 2006. 353 f. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

RICHARDSON, P. L. *et al.* North Brazil Current retrofl ection eddies. **Journal of Geophysical Research**, [S.l.], v. 99, n. 6, p. 997-1014. 1994.

RODRIGUES, J. C.; CASTRO, E. M. R. Companhia Docas do Pará (CDP): plataforma logística do capital internacional na Amazônia Oriental. **Contribuciones a las Ciencias Sociales**, v.20, p.1-14, 2013.

SCHERER, M.; SANCHES, M.; NEGREIROS, D. H. “Gestão das zonas costeiras e as políticas públicas no Brasil: um diagnóstico”. In: BARRAGÁN MUÑOZ, J.M. (coord.). **Manejo costero integrado y política pública en Iberoamérica: un diagnóstico. necesidad de cambio**. Cádiz: Red IBERMAR (CYTED), 2010. p. 292-384.

SANTOS, M. R. S.; VITORINO, M. I.; PIMENTEL, M. A. S. Vulnerabilidade e mudanças climáticas: análise socioambiental em uma mesorregião da Amazônia. **Revista Ambiente & Água-An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v, 12, n.5, p. 842-854, 2017.

SANTOS, M. R. S. *et al.* Padrões de precipitação mensal na mesorregião metropolitana de Belém: uso do CMORPH e componentes principais. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.9, n.7, p.2301-2311. 2016.

SICHE, R. *et al.* Índices versus indicadores: precisões conceituais na discussão da sustentabilidade de países. **Ambiente & Sociedade** Campinas v. X, n. 2 p. 137-148, 2007.

SILVA, M. D. C.; OLIVEIRA, A. S.; NUNES, G. D. Q. Caracterização socioeconômica da pesca artesanal no município de Conceição do Araguaia, Estado do Pará. **Amazônia: Ciência & Desenvolvimento**, v. 2, n. 4, p. 37-51, 2007.

SODRÉ, G. R. *et al.* Estudo observacional da convecção de mesoescala em diferentes superfícies no Estado do Pará **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.8, n.5, p.1281-1293. 2015.

SISTEMA NACIONAL DE UNIDADES DE CONSERVAÇÃO (SNUC). **Lei 9.985** de 18 de julho de 2000. Brasília,DF: Ministério do Meio Ambiente, 2000.

ZANELLA, M. E.; SALES, M. C. L.; ABREU, N. J. A. Análise das precipitações diárias ntensas e impactos gerados em Fortaleza, Ceará. **Espaço e Tempo**, São Paulo, n.25, p.53 - 68, 2009.

SOUZA, E. B. de *et al.* Precipitação sazonal sobre a Amazônia oriental no período chuvoso: Observações e simulações regionais com o RegCM3. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 24, n. 2, p. 111-124, 2009.

SOUZA-FILHO, P.W.M. Costa de manguezais de macromaré da Amazônia: cenários morfológicos, mapeamento e quantificação de áreas usando dados e sensores remotos. **Revista Brasileira de Geofísica**. v. 23, n. 4, p. 427-435, 2005.

SCHUBEL, J. R.; CARTER, H. H. The estuary as a filter for fine-grained suspended sediment. In: The estuary as a filter. **Academic Press**, p. 81-105, 1984.

SZLAFSZTEIN, C.; STERR, H. A GIS-based vulnerability assessment of coastal natural hazards, state of Pará, Brazil. **Journal of Coastal Conservation**, v.11, n.1, p.53-66, 2007.

TOMINAGA, L.K.; SANTORO, J.; AMARAL, R.do. (orgs.). **Desastres naturais: conhecer para prevenir**. São Paulo: Instituto Geológico, 2009, 196p.

UNITED NATIONS OFFICE FOR DISASTER RISK REDUCTION (UNISDR). **Global assessment report on disaster risk reduction: risk and poverty in a changing climate**. Geneva, Switzerland: UNISDR, 2009.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (WMO). **The role of climatological normals under a changing climate**. Geneva, 2007.

APÊNDICE A

Tabela 01 – Resultado índice de Exposição, Região costeira Paraense, Amazônia, Brasil, 2019

(continua)

Município	Área Municipal	Cobertura Vegetal Absoluta	Peso Cobertura Vegetal Absoluta	Cobertura Vegetal relativa	Peso Cobertura Vegetal relativa	ICV	ICV P	Nº de desastres	Proporção de Desastres	Peso Proporção de Desastres	Número de Extremo de Chuva	Proporção de extremo de chuva	Peso Proporção de Extremo de chuva	IDN	IDN P
Afuá	8.338,44	5.577,40	2	0,6689	2	2	0,14	0	0	1	4	0,019	3	2	0,16
Ananindeua	190,451	118,83	5	0,6239	2	3,5	0,57	2	0,03	2	4	0,019	3	2,5	0,33
Augusto Corrêa	1.085,84	798,44	5	0,7353	1	3	0,43	9	0,14	4	5	0,024	4	4	0,83
Barcarena	1.310,34	734,33	5	0,5604	2	3,5	0,57	1	0,01	1	5	0,024	4	2,5	0,33
Belém	1.059,46	360,16	5	0,3399	3	4	0,71	3	0,04	2	1	0,004	1	1,5	0
Benevides	187,826	150,45	5	0,8010	1	3	0,43	0	0	1	4	0,019	3	2	0,16
Bragança	2.098,14	1.362,32	4	0,6493	2	3	0,43	12	0,19	5	7	0,034	4	4,5	1
Cachoeira do Arari	3.100,26	712,19	5	0,2297	4	4,5	0,86	5	0,07	3	7	0,034	4	3,5	0,66
Chaves	12.535,00	6.270,52	1	0,5002	2	1,5	0,00	4	0,06	3	6	0,029	4	3,5	0,66
Colares	384,069	215,62	5	0,5614	2	3,5	0,57	2	0,03	2	4	0,019	3	2,5	0,33
Curuçá	672,948	547,76	5	0,8140	1	3	0,43	3	0,04	2	5	0,024	4	3	0,5
Magalhães Barata	323,984	279,25	5	0,8619	1	3	0,43	0	0	1	7	0,034	4	2,5	0,33
Maracanã	807,628	640,55	5	0,7931	1	3	0,43	0	0	1	9	0,044	4	2,5	0,33
Marapanim	804,76	637,5	5	0,7922	1	3	0,43	4	0,06	3	6	0,029	4	3,5	0,66
Marituba	103,343	78,47	5	0,7593	1	3	0,43	0	0	1	4	0,019	3	2	0,16
Ponta de Pedras	3.363,75	1.728,65	4	0,5139	2	3	0,43	1	0,01	1	4	0,019	3	2	0,16
Primavera	258,6	201,18	5	0,7780	1	3	0,43	1	0,01	1	6	0,029	4	2,5	0,33
Quatipuru	289,622	231,13	5	0,7980	1	3	0,43	1	0,01	1	8	0,039	4	2,5	0,33
Salinópolis	223,156	175,13	5	0,7848	1	3	0,43	1	0,01	1	11	0,054	4	2,5	0,33
Salvaterra	918,563	314,21	5	0,3421	3	4	0,71	0	0	1	14	0,069	5	3	0,5
Santa Bárbara do Pará	278,154	238,27	5	0,8566	1	3	0,43	0	0	1	3	0,014	2	1,5	0
Santa Cruz do Arari	1.076,65	124,48	5	0,1156	5	5	1,00	2	0,03	2	11	0,054	4	3	0,5
Santo Antônio do Tauá	537,625	333,39	5	0,6201	2	3,5	0,57	6	0,09	3	7	0,034	4	3,5	0,66
São Caetano de Odivelas	464,166	357,25	5	0,7697	1	3	0,43	1	0,01	1	9	0,044	4	2,5	0,33

(conclusão)

Município	Área Municipal	Cobertura Vegetal Absoluta	Peso Cobertura Vegetal Absoluta	Cobertura Vegetal relativa	Peso Cobertura Vegetal relativa	ICV	ICV P	Nº de desastres	Proporção de Desastres	Peso Proporção de Desastres	Número de Extremo de Chuva	Proporção de extremo de chuva	Peso Proporção de Extremo de chuva	IDN	IDN P
São João da Ponta	195,918	156,96	5	0,8012	1	3	0,43	2	0,03	2	5	0,024	4	3	0,5
São João de Pirabas	656,245	540,27	5	0,8233	1	3	0,43	0	0	1	7	0,034	4	2,5	0,33
Soure	2.857,35	433,03	5	0,1515	5	5	1,00	1	0,01	1	12	0,059	4	2,5	0,33
Tracuateua	868,999	498,05	5	0,5731	2	3,5	0,57	0	0	1	10	0,049	4	2,5	0,33
Vigia	401,589	292,13	5	0,7274	1	3	0,43	2	0,03	2	7	0,034	4	3	0,5
Viseu	4.939,25	3.245,89	3	0,6572	2	2,5	0,29	0	0	1	9	0,044	4	2,5	0,33

Tabela 01a – Resultado índice de Exposição, Região costeira Paraense, Amazônia, Brasil, 2019

(continua)

Município	Extensão da costa (Km)	Peso Extensão da costa	Distância da costa para o centro urbano (Km)	Peso Distância da costa para o centro urbano	IEC	IEC P	IEx	IEx P
Afuá	127,54	4	0	5	4,5	1,00	0,43	0,36
Ananindeua	0	1	12,46	4	2,5	0,43	0,44	0,38
Augusto Corrêa	119	4	29,27	2	3	0,57	0,61	0,69
Barcarena	47,59	2	12	4	3	0,57	0,49	0,46
Belém	59,81	2	0	5	3,5	0,71	0,47	0,43
Benevides	0	1	27	2	1,5	0,14	0,24	0,01
Bragança	109,17	4	32,76	2	3	0,57	0,67	0,79
Cachoeira do Arari	35,11	2	34,26	2	2	0,29	0,60	0,67
Chaves	283,87	5	0	5	5	1,14	0,60	0,67
Colares	32,12	2	0	5	3,5	0,71	0,54	0,55
Curuçá	85,77	3	20,76	3	3	0,57	0,50	0,48
Magalhães Barata	2	1	11,15	4	2,5	0,43	0,40	0,29
Maracanã	74,21	3	19,51	3	3	0,57	0,44	0,38
Marapanim	46,76	2	19,56	3	2,5	0,43	0,51	0,49
Marituba	0	1	16,26	3	2	0,29	0,29	0,10
Ponta de Pedras	51,85	2	6	4	3	0,57	0,39	0,27
Primavera	0	1	16,61	3	2	0,29	0,35	0,20
Quatipuru	52,67	2	21,7	3	2,5	0,43	0,40	0,29
Salinópolis	35,31	2	0	5	3,5	0,71	0,49	0,47
Salvaterra	30,16	2	0	5	3,5	0,71	0,64	0,74
Santa Bárbara do Pará	0	1	18,91	3	2	0,29	0,24	0,00
Santa Cruz do Arari	0	1	58,7	1	1	0,00	0,50	0,48
Santo Antônio do Tauá	11,44	1	21,97	3	2	0,29	0,51	0,49

(conclusão)

Município	Extensão da costa (Km)	Peso Extensão da costa	Distância da costa para o centro urbano (Km)	Peso Distância da costa para o centro urbano	IEC	IEC P	IEx	IEx P
São Caetano de Odívelas	19,68	1	9,75	4	2,5	0,43	0,40	0,29
São João da Ponta	0	1	17,64	3	2	0,29	0,41	0,31
São João de Pirabas	96,41	4	14,27	3	3,5	0,71	0,49	0,47
Soure	121,02	4	0	5	4,5	1,00	0,78	0,99
Tracuateua	62,5	2	38,14	2	2	0,29	0,40	0,29
Vigia	8,51	1	6,41	4	2,5	0,43	0,45	0,39
Viseu	104,23	4	35,26	2	3	0,57	0,40	0,29

Tabela 02 – Peso final Dengue e Leptospirose

(continua)

Município	Incidência n° casos de Dengue	Proporção de Dengue	Peso da incidência n° casos de Dengue	Peso da proporção de Dengue	Peso Dengue	Peso Dengue P	Incidência n° casos de Leptospirose	Proporção de Leptospirose	Peso da incidência n° casos de Leptospirose	Peso da proporção de Leptospirose	Peso Leptospirose	Peso Leptospirose P
Afuá	4,15	0,06	1	1	2	0,16	11,01	1,22	3	2	5	0,37
Ananindeua	119,54	22,04	2	5	7	1	7,68	10,30	2	4	6	0,5
Augusto Corrêa	320,35	5,05	4	2	6	0,83	1,14	0,17	1	1	2	0
Barcarena	114,15	3,74	2	1	3	0,33	3,80	0,93	1	2	3	0,125
Belém	39,15	22,98	1	5	6	0,83	16,65	74,92	5	5	10	1
Benevides	183,16	3,18	2	1	3	0,33	4,42	0,65	1	1	2	0
Bragança	288,14	12,64	3	4	7	1	10,84	3,99	3	3	6	0,5
Cachoeira do Arari	2,81	0,02	1	1	2	0,16	1,05	0,06	1	1	2	0
Chaves	0,48	0,00	1	1	2	0,16	0,00	0,00	1	1	2	0
Colares	12,98	0,06	1	1	2	0,16	0,47	0,02	1	1	2	0
Curuçá	69,44	0,90	1	1	2	0,16	4,71	0,55	1	1	2	0
Magalhães Barata	17,79	0,06	1	1	2	0,16	2,46	0,08	1	1	2	0
Maracanã	131,65	1,62	2	1	3	0,33	3,21	0,28	1	1	2	0
Marapanim	54,53	0,63	1	1	2	0,16	0,95	0,09	1	1	2	0
Marituba	162,06	6,40	2	3	5	0,66	12,84	3,86	4	3	7	0,875
Ponta de Pedras	52,89	0,56	1	1	2	0,16	3,65	0,28	1	1	2	0
Primavera	47,33	0,21	1	1	2	0,16	2,03	0,08	1	1	2	0
Quatipuru	28,05	0,14	1	1	2	0,16	0,46	0,02	1	1	2	0
Salinópolis	233,85	3,80	3	1	4	0,5	2,18	0,25	1	1	2	0
Salvaterra	81,78	0,68	1	1	2	0,16	1,73	0,11	1	1	2	0
Santa Bárbara do Pará	112,82	0,73	2	1	3	0,33	1,61	0,08	1	1	2	0
Santa Cruz do Arari	0,95	0,00	1	1	2	0,16	0,00	0,00	1	1	2	0
Santo Antônio do Tauá	236,81	2,12	3	1	4	0,5	0,44	0,03	1	1	2	0
São Caetano de Odivelas	22,82	0,16	1	1	2	0,16	0,62	0,03	1	1	2	0

(conclusão)

Município	Incidência n° casos de Dengue	Proporção de Dengue	Peso da incidência n° casos de Dengue	Peso da proporção de Dengue	Peso Dengue	Peso Dengue P	Incidência n° casos de Leptospirose	Proporção de Leptospirose	Peso da incidência n° casos de Leptospirose	Peso da proporção de Leptospirose	Peso Leptospirose	Peso Leptospirose P
São João da Ponta	0,95	0,00	1	1	2	0,16	5,33	0,09	1	1	2	0
São João de Pirabas	258,69	2,13	3	1	4	0,5	0,81	0,06	1	1	2	0
Soure	411,37	3,95	5	1	6	0,83	3,12	0,21	1	1	2	0
Tracuateua	142,45	1,54	2	1	3	0,33	1,02	0,08	1	1	2	0
Vigia	49,07	0,93	1	1	2	0,16	7,52	1,25	2	2	4	0,25
Viseu	129,03	3,66	2	1	3	0,33	1,53	0,28	1	1	2	0

Tabela 03 – Peso Final Esquistossomose

(continua)

Município	Incidência nº casos de Esquistossomose	Proporção de Esquistossomose	Peso da incidência nº casos de Esquistossomose	Peso da proporção de Esquistossomose	Peso Esquistossomose	Peso Esquistossomose P
Afuá	0,00	0,00	1	1	2	0
Ananindeua	0,11	8,73	1	4	5	0,6
Augusto Corrêa	0,27	1,59	2	2	4	0,4
Barcarena	0,13	2,38	1	3	4	0,4
Belém	0,30	72,22	2	5	7	1
Benevides	0,10	0,79	1	2	3	0,2
Bragança	0,05	3,17	1	3	4	0,4
Cachoeira do Arari	0,00	0,00	1	1	2	0
Chaves	0,00	0,00	1	1	2	0
Colares	0,00	0,00	1	1	2	0
Curuçá	0,00	0,00	1	1	2	0
Magalhães Barata	0,00	0,00	1	1	2	0
Maracanã	0,00	0,00	1	1	2	0
Marapanim	0,19	0,79	2	2	4	0,4
Marituba	0,07	0,79	1	2	3	0,2
Ponta de Pedras	0,27	0,79	2	2	4	0,4
Primavera	0,00	0,00	1	1	2	0
Quatipuru	0,86	1,59	5	2	7	1
Salinópolis	0,00	0,00	1	1	2	0
Salvaterra	0,00	0,00	1	1	2	0
Santa Bárbara do Pará	0,00	0,00	1	1	2	0
Santa Cruz do Arari	0,61	0,79	4	2	6	0,8
Santo Antônio do Tauá	0,25	0,79	2	2	4	0,4
São Caetano de Odivelas	0,00	0,00	1	1	2	0

(conclusão)

Município	Incidência n° casos de Esquistossomose	Proporção de Esquistossomose	Peso da incidência n° casos de Esquistossomose	Peso da proporção de Esquistossomose	Peso Esquistossomose	Peso Esquistossomose P
São João da Ponta	0,00	0,00	1	1	2	0
São João de Pirabas	0,00	0,00	1	1	2	0
Soure	0,00	0,00	1	1	2	0
Tracuateua	0,40	1,59	3	2	5	0,6
Vigia	0,21	1,59	2	2	4	0,4
Viseu	0,20	2,38	2	3	5	0,6

Tabela 04 – Resultado índice de Doenças Endêmicas, Região Costeira, Brasil, 2019

(continua)

Município	Peso Dengue P	Peso Leptospirose P	Peso Esquistossomose P	IDE	IDE P
Afuá	0,16	0,37	0	0,177	0,14
Ananindeua	1	0,5	0,6	0,700	0,73
Augusto Corrêa	0,83	0	0,4	0,410	0,40
Barcarena	0,33	0,125	0,4	0,285	0,26
Belém	0,83	1	1	0,943	1,00
Benevides	0,33	0	0,2	0,177	0,14
Bragança	1	0,5	0,4	0,633	0,66
Cachoeira do Arari	0,16	0	0	0,053	0,00
Chaves	0,16	0	0	0,053	0,00
Colares	0,16	0	0	0,053	0,00
Curuçá	0,16	0	0	0,053	0,00
Magalhães Barata	0,16	0	0	0,053	0,00
Maracanã	0,33	0	0	0,110	0,07
Marapanim	0,16	0	0,4	0,187	0,15
Marituba	0,66	0,875	0,2	0,578	0,59
Ponta de Pedras	0,16	0	0,4	0,187	0,15
Primavera	0,16	0	0	0,053	0,00
Quatipuru	0,16	0	1	0,387	0,38
Salinópolis	0,5	0	0	0,167	0,13
Salvaterra	0,16	0	0	0,053	0,00
Santa Bárbara do Pará	0,33	0	0	0,110	0,07
Santa Cruz do Arari	0,16	0	0,8	0,320	0,30
Santo Antônio do Tauá	0,5	0	0,4	0,300	0,28
São Caetano de Odíveas	0,16	0	0	0,053	0,00

(conclusão)

Município	Peso Dengue P	Peso Leptospirose P	Peso Esquistossomose P	IDE	IDE P
São João da Ponta	0,16	0	0	0,053	0,00
São João de Pirabas	0,5	0	0	0,167	0,13
Soure	0,83	0	0	0,277	0,26
Tracuateua	0,33	0	0,6	0,310	0,29
Vigia	0,16	0,25	0,4	0,270	0,25
Viseu	0,33	0	0,6	0,310	0,29

Tabela 05 – Resultado Índice Sociodemográfico, Região costeira Paraense, Amazônia, Brasil, 2019

(continua)

Município	Pop. Analfa. 25a	Peso Pop. Analfa. 25a	Pop. Analfa. 25a P	Mort. 5a	Peso Mort. 5a	Mort. 5ª P	Sanea. Inadq.	Peso Sanea. Inadq.	Sanea. Inadq. P	Pop. Econ. Inativa	Peso Pop. Econ. Inativa	Pop. Econ. Inativa P	ISD	ISD P
Afuá	38,28	5	1	24,5	4	0,75	68,6	4	0,75	33,3	3	0,5	4	0,923
Ananindeua	4,21	1	0	18,5	2	0,25	1,5	1	0	21,3	1	0	1,25	0,077
Augusto Corrêa	34,8	4	0,75	24,9	4	0,75	35	1	0	45,5	5	1	3,5	0,769
Barcarena	11,3	2	0,25	20	3	0,5	15	1	0	21,1	1	0	1,75	0,231
Belém	4	1	0	17,3	1	0	1,4	1	0	24,6	1	0	1	0,000
Benevides	8,7	2	0,25	20,4	3	0,5	8,8	1	0	20,7	1	0	1,75	0,231
Bragança	20,6	2	0,25	28,1	4	0,75	30,1	1	0	34,7	3	0,5	2,5	0,462
Cachoeira do Arari	17,1	2	0,25	23,9	4	0,75	42,7	1	0	34,5	3	0,5	2,5	0,462
Chaves	33,7	4	0,75	25,3	4	0,75	82,2	5	1	36,6	4	0,75	4,25	1,000
Colares	13,8	2	0,25	26,4	4	0,75	19,9	1	0	38,1	4	0,75	2,75	0,538
Curuçá	13,9	2	0,25	27,4	4	0,75	9,8	1	0	41,2	4	0,75	2,75	0,538
Magalhães Barata	13,8	2	0,25	21,4	3	0,5	8,3	1	0	45,4	5	1	2,75	0,538
Maracanã	15,6	2	0,25	26,2	4	0,75	25,6	1	0	39,9	4	0,75	2,75	0,538
Marapanim	12	2	0,25	27	4	0,75	14,3	1	0	34,7	3	0,5	2,5	0,462
Marituba	5,9	1	0	21,2	3	0,5	7,3	1	0	21,9	1	0	1,5	0,154
Ponta de Pedras	19,1	2	0,25	24,7	4	0,75	39,7	1	0	32,5	3	0,5	2,5	0,462
Primavera	27,1	3	0,5	24,9	4	0,75	19,1	1	0	22,9	1	0	2,25	0,385
Quatipuru	29	3	0,5	32,7	5	1	26,3	1	0	32,4	3	0,5	3	0,615
Salinópolis	14,7	2	0,25	20,5	3	0,5	8,4	1	0	25,3	1	0	1,75	0,231
Salvaterra	11,5	2	0,25	21,2	3	0,5	14,2	1	0	37,3	4	0,75	2,5	0,462
Santa Bárbara do Pará	11	2	0,25	22,7	4	0,75	22,9	1	0	29	2	0,25	2,25	0,385
Santa Cruz do Arari	14,5	2	0,25	24,3	4	0,75	15,7	1	0	37,3	4	0,75	2,75	0,538

(conclusão)

Município	Pop. Analfa. 25a	Peso Pop. Analfa. 25a	Pop. Analfa. 25a P	Mort. 5a	Peso Mort. 5a	Mort. 5ª P	Sanea. Inadq.	Peso Sanea. Inadq.	Sanea. Inadq. P	Pop. Econ. Inativa	Peso Pop. Econ. Inativa	Pop. Econ. Inativa P	ISD	ISD P
Santo Antônio do Tauá	15,2	2	0,25	28,3	4	0,75	14,8	1	0	27,9	2	0,25	2,25	0,385
São Caetano de Odivelas	14,3	2	0,25	25,8	4	0,75	20,1	1	0	33,6	3	0,5	2,5	0,462
São João da Ponta	11	2	0,25	25,8	4	0,75	12,7	1	0	38,2	4	0,75	2,75	0,538
São João de Pirabas	27,42	3	0,5	28,3	4	0,75	30,1	1	0	37,2	4	0,75	3	0,615
Soure	11,7	2	0,25	27,1	4	0,75	10,4	1	0	32	3	0,5	2,5	0,462
Tracuateua	28,1	3	0,5	24,1	4	0,75	56,6	3	0,5	28,3	2	0,25	3	0,615
Vigia	12,9	2	0,25	25,6	4	0,75	12,2	1	0	31	3	0,5	2,5	0,462
Viseu	28,5	3	0,5	24,1	4	0,75	50,3	2	0,25	46,8	5	1	3,5	0,769

Tabela 06 – Resultado Índice Sensibilidade, Região costeira Paraense, Amazônia, Brasil, 2019

(continua)

Município	IDE P	ISD P	ISe	ISe P
Afuá	0,14	0,92	0,53	0,86
Ananindeua	0,73	0,08	0,40	0,55
Augusto Corrêa	0,40	0,77	0,59	0,99
Barcarena	0,26	0,23	0,25	0,16
Belém	1,00	0,00	0,50	0,78
Benevides	0,14	0,23	0,19	0,02
Bragança	0,66	0,46	0,56	0,92
Cachoeira do Arari	0,00	0,46	0,23	0,13
Chaves	0,00	1,00	0,50	0,78
Colares	0,00	0,54	0,27	0,22
Curuçá	0,00	0,54	0,27	0,22
Magalhães Barata	0,00	0,54	0,27	0,22
Maracanã	0,07	0,54	0,30	0,30
Marapanim	0,15	0,46	0,31	0,31
Marituba	0,59	0,15	0,37	0,47
Ponta de Pedras	0,15	0,46	0,31	0,31
Primavera	0,00	0,39	0,19	0,03
Quatipuru	0,38	0,62	0,50	0,77
Salinópolis	0,13	0,23	0,18	0,00
Salvaterra	0,00	0,46	0,23	0,13
Santa Bárbara do Pará	0,07	0,39	0,23	0,11
Santa Cruz do Arari	0,30	0,54	0,42	0,59
Santo Antônio do Tauá	0,28	0,39	0,33	0,37
São Caetano de Odívelas	0,00	0,46	0,23	0,13

(conclusão)

Município	IDE P	ISD P	ISe	ISe P
São João da Ponta	0,00	0,54	0,27	0,22
São João de Pirabas	0,13	0,62	0,37	0,47
Soure	0,26	0,46	0,36	0,44
Tracuateua	0,29	0,62	0,45	0,67
Vigia	0,25	0,46	0,35	0,43
Viseu	0,29	0,77	0,53	0,86

Tabela 07 – Resultado Índice Capacidade Adaptativa, Região costeira Paraense, Amazônia, Brasil, 2019

(continua)

Município	IFDM	Peso IFDM	Peso IFDM P	ICAB	Peso ICAB	Peso ICAB P	ICA	ICA P
Afuá	0,450	5	1	26,63	5	1	1	1,000
Ananindeua	0,660	2	0,25	84,57	2	0,25	0,25	0,143
Augusto Corrêa	0,512	3	0,5	100	1	0	0,25	0,143
Barcarena	0,696	1	0	91,45	2	0,25	0,125	0,000
Belém	0,692	1	0	39,43	4	0,75	0,375	0,286
Benevides	0,662	2	0,25	100	1	0	0,125	0,000
Bragança	0,566	3	0,5	100	1	0	0,25	0,143
Cachoeira do Arari	0,468	4	0,75	29,40	5	1	0,875	0,857
Chaves	0,560	3	0,5	44,08	4	0,75	0,625	0,571
Colares	0,619	2	0,25	100	1	0	0,125	0,000
Curuçá	0,471	4	0,75	87,25	2	0,25	0,5	0,429
Magalhães Barata	0,527	3	0,5	100	1	0	0,25	0,143
Maracanã	0,446	5	1	100	1	0	0,5	0,429
Marapanim	0,501	3	0,5	85,58	2	0,25	0,375	0,286
Marituba	0,650	2	0,25	69,15	3	0,5	0,375	0,286
Ponta de Pedras	0,501	3	0,5	67,63	3	0,5	0,5	0,429
Primavera	0,641	2	0,25	100	1	0	0,125	0,000
Quatipuru	0,553	3	0,5	56,61	3	0,5	0,5	0,429
Salinópolis	0,634	2	0,25	100	1	0	0,125	0,000
Salvaterra	0,508	3	0,5	73,64	3	0,5	0,5	0,429
Santa Bárbara do Pará	0,596	2	0,25	100	1	0	0,125	0,000
Santa Cruz do Arari	0,540	3	0,5	100	1	0	0,25	0,143
Santo Antônio do Tauá	0,501	3	0,5	100	1	0	0,25	0,143

(conclusão)

Município	IFDM	Peso IFDM	Peso IFDM P	ICAB	Peso ICAB	Peso ICAB P	ICA	ICA P
São Caetano de Odivelas		4	0,75	100	1	0	0,375	0,286
São João da Ponta	0,607	2	0,25	100	1	0	0,125	0,000
São João de Pirabas	0,555	3	0,5	100	1	0	0,25	0,143
Soure	0,537	3	0,5	54,80	3	0,5	0,5	0,429
Tracuateua	0,4369	5	1	100	1	0	0,5	0,429
Vigia	0,4687	4	0,75	64,92	3	0,5	0,625	0,571
Viseu	0,5189	3	0,5	62,16	3	0,5	0,5	0,429

Tabela 08 – Resultado do Índice Climático, Região costeira Paraense, Amazônia, Brasil, 2019

(continua)

Município	Anom. Prec. 4.5	Anom. Temp. 4.5	Peso Anom. Prec. 4.5	Peso Anom. Temp. 4.5	IC 4.5	IC 4,5 P	Anom. Prec. 8.5	Anom. Temp. 8.5	Peso Anom. Prec. 8.5	Peso Anom. Temp. 8.5	IC 8.5	IC 8.5 P
Afuá	- 764,66	1,75	3	5	4	1,0	-852,44	2,26	4	5	4,5	1
Ananindeua	- 441,62	1,74	2	5	3,5	0,8	-554,25	2,22	1	5	3	0,4
Augusto Corrêa	- 544,86	1,40	2	1	1,5	0,0	-755,59	1,81	3	1	2	0
Barcarena	- 383,83	1,78	2	5	3,5	0,8	-490,16	2,25	1	5	3	0,4
Belém	- 497,22	1,69	2	4	3	0,6	-636,59	2,15	2	4	3	0,4
Benevides	- 424,32	1,75	2	5	3,5	0,8	-537,81	2,21	1	5	3	0,4
Bragança	- 927,73	1,44	4	1	2,5	0,4	-727,05	1,87	3	1	2	0
Cachoeira do Arari	- 605,14	1,68	2	4	3	0,6	-755,42	2,12	3	4	3,5	0,6
Chaves	- 869,08	1,61	4	3	3,5	0,8	1004,26	2,07	5	4	4,5	1
Colares	- 630,86	1,62	2	3	2,5	0,4	-771,98	2,00	3	3	3	0,4
Curuçá	- 892,89	1,60	4	3	3,5	0,8	-807,26	1,99	4	3	3,5	0,6
Magalhães Barata	- 595,38	1,59	2	3	2,5	0,4	-791,00	2,00	4	3	3,5	0,6
Maracanã	- 564,42	1,53	2	2	2	0,2	-760,71	1,96	3	2	2,5	0,2
Marapanim	- 853,66	1,59	4	3	3,5	0,8	-791,00	2,00	4	3	3,5	0,6
Marituba	- 441,62	1,74	2	5	3,5	0,8	-554,25	2,22	1	5	3	0,4
Ponta de Pedras	- 500,70	1,67	2	4	3	0,6	-635,32	2,14	2	4	3	0,4
Primavera	- 518,91	1,52	2	2	2	0,2	-710,42	1,97	3	2	2,5	0,2
Quatipuru	- 520,92	1,49	2	2	2	0,2	-714,67	1,93	3	2	2,5	0,2
Salinópolis	- 609,49	1,39	2	1	1,5	0,0	-813,96	1,79	4	1	2,5	0,2
Salvaterra	- 264,72	1,53	1	2	1,5	0,0	-869,42	1,93	4	2	3	0,4
Santa Bárbara do Pará	- 520,08	1,67	2	4	3	0,6	-662,45	2,09	2	4	3	0,4
Santa Cruz do Arari	- 694,46	1,62	3	3	3	0,6	-841,04	2,04	4	3	3,5	0,6

(conclusão)

Município	Anom. Prec. 4.5	Anom. Temp. 4.5	Peso Anom. Prec. 4.5	Peso Anom. Temp. 4.5	IC 4.5	IC 4,5 P	Anom. Prec. 8.5	Anom. Temp. 8.5	Peso Anom. Prec. 8.5	Peso Anom. Temp. 8.5	IC 8.5	IC 8.5 P
Santo Antônio do Tauá	- 520,08	1,67	2	4	3	0,6	-662,45	2,09	2	4	3	0,4
São Caetano de Odivelas	- 1208,45	1,57	5	3	4	1,0	-821,04	1,94	4	2	3	0,4
São João da Ponta	- 653,76	1,53	2	2	2	0,2	-821,04	1,94	4	2	3	0,4
São João de Pirabas	- 551,25	1,51	2	2	2	0,2	-749,90	1,90	3	1	2	0
Soure	- 702,11	1,53	3	2	2,5	0,4	-869,42	1,93	4	2	3	0,4
Tracuateua	- 530,93	1,44	2	1	1,5	0,0	-727,05	1,87	3	1	2	0
Vigia	- 750,59	1,47	3	2	2,5	0,4	-921,65	1,83	5	1	3	0,4
Viseu	- 515,12	1,43	2	1	1,5	0,0	-724,11	1,84	3	1	2	0

Tabela 09 – Resultado do Índice de Vulnerabilidade Geral e Índice de Municipal de Vulnerabilidade, Região Costeira, Pará, 2019

(continua)

Município	IEx p	ISe p	ICA p	IVG	IVG p	IC 4.5 p	IC 8.5 p	IMV 4.5	IMV 8.5	IMV 4.5 p	IMV 8.5 p
Afuá	0,36	0,86	1,00	0,74	1,00	1,0	1	1,00	1,00	1,00	1,00
Ananindeua	0,38	0,55	0,14	0,36	0,47	0,8	0,4	0,64	0,44	0,59	0,34
Augusto Corrêa	0,69	0,99	0,14	0,61	0,82	0,0	0	0,41	0,41	0,34	0,31
Barcarena	0,46	0,16	0,00	0,21	0,27	0,8	0,4	0,54	0,34	0,48	0,22
Belém	0,43	0,78	0,29	0,50	0,67	0,6	0,4	0,64	0,54	0,59	0,45
Benevides	0,01	0,02	0,00	0,01	0,00	0,8	0,4	0,40	0,20	0,33	0,06
Bragança	0,79	0,92	0,14	0,62	0,83	0,4	0	0,62	0,42	0,57	0,31
Cachoeira do Arari	0,67	0,13	0,86	0,55	0,74	0,6	0,6	0,67	0,67	0,63	0,61
Chaves	0,67	0,78	0,57	0,67	0,91	0,8	1	0,86	0,96	0,84	0,95
Colares	0,55	0,22	0,00	0,26	0,34	0,4	0,4	0,37	0,37	0,30	0,26
Curuçá	0,48	0,22	0,43	0,38	0,50	0,8	0,6	0,65	0,55	0,61	0,47
Magalhães Barata	0,29	0,22	0,14	0,22	0,28	0,4	0,6	0,34	0,44	0,27	0,34
Maracanã	0,38	0,30	0,43	0,37	0,49	0,2	0,2	0,35	0,35	0,27	0,23
Marapanim	0,49	0,31	0,29	0,36	0,48	0,8	0,6	0,64	0,54	0,60	0,46
Marituba	0,10	0,47	0,29	0,28	0,38	0,8	0,4	0,59	0,39	0,54	0,28
Ponta de Pedras	0,27	0,31	0,43	0,34	0,45	0,6	0,4	0,53	0,43	0,47	0,32
Primavera	0,20	0,03	0,00	0,08	0,09	0,2	0,2	0,15	0,15	0,05	-0,01
Quatipuru	0,29	0,77	0,43	0,50	0,67	0,2	0,2	0,44	0,44	0,37	0,34
Salinópolis	0,47	0,00	0,00	0,16	0,20	0,0	0,2	0,10	0,20	0,00	0,06
Salvterra	0,74	0,13	0,43	0,43	0,58	0,0	0,4	0,29	0,49	0,21	0,40
Santa Bárbara do Pará	0,00	0,11	0,00	0,04	0,04	0,6	0,4	0,32	0,22	0,24	0,08
Santa Cruz do Arari	0,48	0,59	0,14	0,40	0,54	0,6	0,6	0,57	0,57	0,52	0,49
Santo Antônio do Tauá	0,49	0,37	0,14	0,33	0,44	0,6	0,4	0,52	0,42	0,47	0,32

(conclusão)

Município	IEx p	ISe p	ICA p	IVG	IVG p	IC 4.5 p	IC 8.5 p	IMV 4.5	IMV 8.5	IMV 4.5 p	IMV 8.5 p
São Caetano de Odivelas	0,29	0,13	0,29	0,24	0,31	1,0	0,4	0,66	0,36	0,62	0,24
São João da Ponta	0,31	0,22	0,00	0,18	0,23	0,2	0,4	0,22	0,32	0,13	0,19
São João de Pirabas	0,47	0,47	0,14	0,36	0,48	0,2	0	0,34	0,24	0,27	0,11
Soure	0,99	0,44	0,43	0,62	0,84	0,4	0,4	0,62	0,62	0,58	0,55
Tracuateua	0,29	0,67	0,43	0,46	0,62	0,0	0	0,31	0,31	0,23	0,19
Vigia	0,39	0,43	0,57	0,47	0,62	0,4	0,4	0,51	0,51	0,46	0,42
Viseu	0,29	0,86	0,43	0,53	0,71	0,0	0	0,36	0,36	0,28	0,24

Tabela 10 – Síntese dos Resultado do Índice de Vulnerabilidade Geral e Índice de Vulnerabilidade Humana, Região Costeira, Pará, 2019 –
Resultados padronizados

Município	ICV	IDN	IEC	IEx	IDE	ISD	ISe	IFDM	ICAB	ICA	IVG	IC 4.5	IC 8.5	IVH 4.5	VH 8.5
Afuá	0,14	0,16	1,00	0,36	0,14	0,92	0,86	1	1	1,00	1,00	1,0	1	1,00	1,00
Ananindeua	0,57	0,33	0,43	0,38	0,73	0,08	0,55	0,25	0,25	0,14	0,47	0,8	0,4	0,59	0,34
Augusto Corrêa	0,43	0,83	0,57	0,69	0,40	0,77	0,99	0,5	0	0,14	0,82	0,0	0	0,34	0,31
Barcarena	0,57	0,33	0,57	0,46	0,26	0,23	0,16	0	0,25	0,00	0,27	0,8	0,4	0,48	0,22
Belém	0,71	0	0,71	0,43	1,00	0,00	0,78	0	0,75	0,29	0,67	0,6	0,4	0,59	0,45
Benevides	0,43	0,16	0,14	0,01	0,14	0,23	0,02	0,25	0	0,00	0,00	0,8	0,4	0,33	0,06
Bragança	0,43	1	0,57	0,79	0,66	0,46	0,92	0,5	0	0,14	0,83	0,4	0	0,57	0,31
Cachoeira do Arari	0,86	0,66	0,29	0,67	0,00	0,46	0,13	0,75	1	0,86	0,74	0,6	0,6	0,63	0,61
Chaves	0,00	0,66	1,14	0,67	0,00	1,00	0,78	0,5	0,75	0,57	0,91	0,8	1	0,84	0,95
Colares	0,57	0,33	0,71	0,55	0,00	0,54	0,22	0,25	0	0,00	0,34	0,4	0,4	0,30	0,26
Curuçá	0,43	0,5	0,57	0,48	0,00	0,54	0,22	0,75	0,25	0,43	0,50	0,8	0,6	0,61	0,47
Magalhães Barata	0,43	0,33	0,43	0,29	0,00	0,54	0,22	0,5	0	0,14	0,28	0,4	0,6	0,27	0,34
Maracanã	0,43	0,33	0,57	0,38	0,07	0,54	0,30	1	0	0,43	0,49	0,2	0,2	0,27	0,23
Marapanim	0,43	0,66	0,43	0,49	0,15	0,46	0,31	0,5	0,25	0,29	0,48	0,8	0,6	0,60	0,46
Marituba	0,43	0,16	0,29	0,10	0,59	0,15	0,47	0,25	0,5	0,29	0,38	0,8	0,4	0,54	0,28
Ponta de Pedras	0,43	0,16	0,57	0,27	0,15	0,46	0,31	0,5	0,5	0,43	0,45	0,6	0,4	0,47	0,32
Primavera	0,43	0,33	0,29	0,20	0,00	0,39	0,03	0,25	0	0,00	0,09	0,2	0,2	0,05	-0,01
Quatipuru	0,43	0,33	0,43	0,29	0,38	0,62	0,77	0,5	0,5	0,43	0,67	0,2	0,2	0,37	0,34
Salinópolis	0,43	0,33	0,71	0,47	0,13	0,23	0,00	0,25	0	0,00	0,20	0,0	0,2	0,00	0,06
Salvaterra	0,71	0,5	0,71	0,74	0,00	0,46	0,13	0,5	0,5	0,43	0,58	0,0	0,4	0,21	0,40
Santa Bárbara do Pará	0,43	0	0,29	0,00	0,07	0,39	0,11	0,25	0	0,00	0,04	0,6	0,4	0,24	0,08
Santa Cruz do Arari	1,00	0,5	0,00	0,48	0,30	0,54	0,59	0,5	0	0,14	0,54	0,6	0,6	0,52	0,49
Santo Antônio do Tauá	0,57	0,66	0,29	0,49	0,28	0,39	0,37	0,5	0	0,14	0,44	0,6	0,4	0,47	0,32
São Caetano de Odivelas	0,43	0,33	0,43	0,29	0,00	0,46	0,13	0,75	0	0,29	0,31	1,0	0,4	0,62	0,24
São João da Ponta	0,43	0,5	0,29	0,31	0,00	0,54	0,22	0,25	0	0,00	0,23	0,2	0,4	0,13	0,19
São João de Pirabas	0,43	0,33	0,71	0,47	0,13	0,62	0,47	0,5	0	0,14	0,48	0,2	0	0,27	0,11
Soure	1,00	0,33	1,00	0,99	0,26	0,46	0,44	0,5	0,5	0,43	0,84	0,4	0,4	0,58	0,55
Tracuateua	0,57	0,33	0,29	0,29	0,29	0,62	0,67	1	0	0,43	0,62	0,0	0	0,23	0,19
Vigia	0,43	0,5	0,43	0,39	0,25	0,46	0,43	0,75	0,5	0,57	0,62	0,4	0,4	0,46	0,42
Viseu	0,29	0,33	0,57	0,29	0,29	0,77	0,86	0,5	0,5	0,43	0,71	0,0	0	0,28	0,24