

VULNERABILIDADE DAS ÁREAS ÚMIDAS E INFLUÊNCIA SAZONAL DA PRECIPITAÇÃO PLUVIOMÉTRICA NA AMAZÔNIA ORIENTAL

VULNERABILITY OF WETLANDS AND SEASONAL INFLUENCE OF RAINFALL IN
EASTERN AMAZON

VULNERABILIDAD DE LOS HUMEDALES Y INFLUENCIA ESTACIONAL DE LAS
PRECIPITACIONES EN EL ESTE AMAZÓNICO

Nedilson Sanches Ferreira¹

Aline Maria Meiguins de Lima²

Dênis Jose Cardoso Gomes³

Resumo: O nordeste do Estado do Pará faz parte de uma área complexa, sujeita a variações de maré e elevado volume de chuvas. A população residente se adapta as variações existentes, porém nos momentos de extremos climáticos sofre as consequências dos períodos de maior/menor intensidade das chuvas. O objetivo deste trabalho consiste em analisar a variação espacial das áreas úmidas e sua vulnerabilidade, em função da influência da sazonalidade da precipitação pluviométrica. Constou do mapeamento das áreas topograficamente vulneráveis (sazonalmente alagadas) e seu cruzamento por álgebra de mapas com a distribuição mensal da precipitação pluviométrica, destacando o período mais chuvoso e o menos chuvoso. Foram utilizados os dados de precipitação do CHIRPS, de temperatura da superfície do MODIS, topográficos do SRTM e de uso e cobertura da terra do projeto MapBiomias para o ano de 2020. Os resultados indicaram que a região representa uma zona de elevada vulnerabilidade, por ser predominantemente formada por áreas sujeitas à ação das águas e interferência das chuvas. Os municípios componentes devem atuar no processo de avaliação do risco de ocupação destas áreas, e do o impacto sobre as de maior sensibilidade ecológica (áreas de preservação permanente).

Palavras-chave: precipitação pluviométrica, vulnerabilidade, uso e cobertura da terra.

¹ Graduado em Meteorologia pela Universidade Federal do Pará. Belém/PR. Email: nedilsonlive@gmail.com. Lattes iD: <http://lattes.cnpq.br/0727207158085112>. Orcid iD: <https://orcid.org/0000-0001-8338-9274>.

² Doutora em Desenvolvimento Socioambiental pela Universidade Federal do Pará. Professora da Universidade Federal do Pará. Belém/PR. Email: alinemeiguins@gmail.com. Lattes iD: <http://lattes.cnpq.br/6572852379381594>. Orcid iD: <https://orcid.org/0000-0002-0594-0187>

³ Mestre em Ciências Ambientais pela Universidade do Estado do Pará. Belém/PR. Email: deniss.feg@gmail.com. Lattes iD: <http://lattes.cnpq.br/1987185580532060>. Orcid iD: <https://orcid.org/0000-0001-6441-6783>.

Abstract: The northeast of the State of Pará is part of a complex region subject to tidal variations and high rainfall. The resident population adapts to the existing variation. However, in times of extreme weather, it suffers the consequences of periods of greater/lesser precipitation. The main goal is to analyze the spatial variation of wetlands, their vulnerability, and the influence of rainfall seasonality. The methodology consisted of mapping topographically vulnerable areas (seasonally flooded) and crossing them by map algebra with the monthly rainfall distribution, highlighting the wettest and least rainy seasons. The database used was: CHIRPS precipitation data, MODIS surface temperature, SRTM topographic data, and the MapBiomas project land use and cover data (2020 Year). The results indicated that the region represents a high vulnerability zone formed by areas subject to the action of water and rain interference. The municipal management must act on the environmental risk and ecological sensitivity (permanent preservation areas) control and reduction.

Keywords: rainfall, vulnerability, land use and land cover.

Resumen: El noreste del estado de Pará forma parte de una zona compleja, sujeta a variaciones de mareas y altas precipitaciones. La población residente se adapta a las variaciones existentes, pero en épocas de clima extremo sufre las consecuencias de períodos de lluvias superiores/inferiores. El objetivo de este trabajo es analizar la variación espacial de los humedales y su vulnerabilidad, según la influencia de la naturaleza estacional de las lluvias. Consistió en mapear las áreas topográficamente vulnerables (estacionalmente inundadas) y cruzarlas por álgebra de mapas con la distribución mensual de precipitaciones, destacando los períodos más lluviosos y menos lluviosos. Se utilizaron datos de precipitación de CHIRPS, temperatura superficial de MODIS, topografía de SRTM y uso y cobertura de suelo del proyecto MapBiomas (año 2020). Según los resultados, la región es una zona muy vulnerable. Consiste principalmente en zonas sujetas a la acción del agua y la interferencia de las lluvias. Las municipalidades que las integran deben actuar en el proceso de evaluación del riesgo de ocupación de esas zonas. Y el impacto sobre los que tienen mayor sensibilidad ecológica (zonas de preservación permanente).

Palabras clave: lluvia, vulnerabilidad, uso y cobertura del suelo.

Introdução

Um das regiões de grande importância nos serviços ecossistêmicos são os estuários (SALDANHA; COSTA, 2019), que são ambientes aquáticos de transição na interface continente-oceano que recebem materiais provenientes da drenagem continental carreados pelos rios, tendo uma livre conexão com o mar aberto (DYER, 1995). Esse ambiente é forçado por agentes locais e remotos, gerados pela ação de eventos climáticos oriundos do acoplamento oceano-atmosfera, hidrogeológicos e biogeoquímicos, que ocorrem na bacia de drenagem e no oceano adjacente muitas vezes a dezenas, centenas e até milhares de quilômetros de distância (ALCÂNTARA, 2004).

A pluviosidade amazônica é bastante heterogênea, sendo caracterizada por uma forte variabilidade espacial e temporal, relacionadas à interação de diferentes sistemas atmosféricos

(CHAVES, 2011) de grande escala, como a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), em que sua principal função é modular os períodos chuvosos e menos chuvosos (FERREIRA et al., 2015), além dos sistemas convectivos locais (COHEN et al., 2014), tal como linhas de instabilidade formadas ao longo da costa atlântica (ALCÂNTARA et al., 2011). Encontra-se em uma faixa entre 2.300 a 2.800 mm (acumulado anual), com duração da estação chuvosa em torno de 7 meses (de janeiro a julho), onde os maiores índices são observados entre os meses de março a maio e de dezembro a fevereiro, sendo o mês de março os maiores valores (cerca de 438 mm/mês), com a influência da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) para a configuração destes (FIGUEROA; NOBRE, 1990; MORAES et al., 2005; PEEL et al., 2007; MORAES; FILHO, 2018).

A complexidade da bacia hidrográfica Amazônica tem um histórico diretamente associado aos eventos que ocorreram durante o Cenozoico e foram responsáveis pelo soerguimento dos Andes, conforme descrito em Sacek (2014), onde no início do Mioceno os sistemas fluviais eram direcionados para as bacias subandinas e norte do Caribe; com os processos tectônicos ativos na costa Pacífica, o final do Mioceno foi marcado pela formação do rio Amazonas transcontinental, conectando os Andes à margem equatorial do Atlântico, ocorrendo no momento da reversão da drenagem um elevado transporte de sedimentos, que teve como consequência a atual configuração do estuário Amazônico (ZOLNERKEVIC, 2014). Este tem um componente singular que é o Arquipélago do Marajó, onde Latrubesse et al. (2010) destacam que durante o Plioceno, a Amazônia brasileira deixou de ser uma bacia sedimentar eficaz e tornou-se uma área erosiva de elevada contribuição sedimentar, drenando água e sedimentos em larga escala para o oceano Atlântico. Soares Júnior et al. (2008) apresentam o maior detalhamento geológico deste complexo sistema, formado a partir de uma sucessão de eventos tectônicos, cujos processos são ativos até a atualidade, uma vez que ainda se mantém a dinâmica de erosão/deposição sedimentar que condiciona configuração geométrica presente.

O estuário-foz da bacia hidrográfica amazônica tornou-se desta forma, um conjunto de elevada hidrodinâmica, que ainda recebe uma contribuição totalmente diferenciada da porção ocidental, marcada pelos sedimentos e águas andinos oriundos da bacia hidrográfica do rio Tocantins, e junto com seu principal afluente o rio Araguaia, traz uma significativa contribuição sedimentar e hídrica da região central do Brasil, desaguando a sudeste da Ilha do Marajó (MARINHA DO BRASIL, 2017). Neste ponto, existe uma questão geográfica relevante.

Tradicionalmente se reconhece um conjunto de águas onde inicia a Baía de Caxiuanã, a sudoeste da ilha do Marajó. Suas águas contornam a parte sul da ilha, passando a ter a denominação neste setor de rio Pará, que recebe as águas do rio Tocantins após a sede municipal de São Sebastião da Boa Vista (Marajó). Assim, apesar o rio Pará não constituir uma bacia hidrográfica específica, esta passa a representar o principal curso d'água da porção oriental da foz do rio Amazonas (ANA, 2017). A denominação rio Amazonas passa a caracterizar o sistema que drena a porção ocidental, paralela ao limite entre os estados do Pará e Amapá.

O histórico apresentado e o contexto geográfico permitem entender a importância de se compreender os processos que ocorrem nesta região, pois além de conter diversos municípios que apresentam uma forte relação socioeconômica com as águas, abrangendo também a capital paraense Belém-PA. Tais municípios convivem com a dinâmica hídrica e seu processo de formação está intimamente ligado a água, apresentando forte tendência a ocupação das margens fluviais, além de compor um conjunto de áreas sujeitas a alagamentos sazonais. O adensamento deste processo tem gerado diversas situações de risco para estas populações como abordado em Coutinho et al. (2017). A partir disto, derivou o principal problema de pesquisa discutido, o questionamento do grau de vulnerabilidade destas áreas sujeitas a alagamentos sazonais e a contribuição da precipitação pluviométrica neste processo, onde o estudo de sua variabilidade espacial e temporal é essencial em setores estruturais, como a navegação, agricultura, energia e prevenção de desastres naturais provenientes dos eventos extremos de chuva (SANTOS et al., 2016).

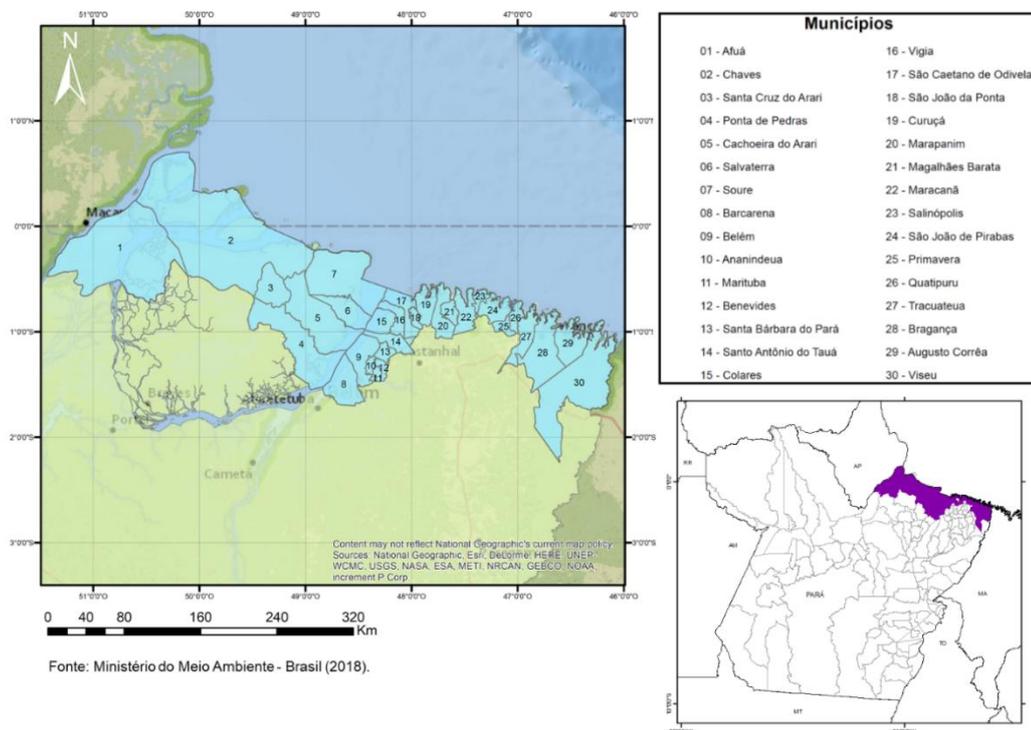
Os estuários, segundo Cunha et al. (2015), são admitidos como áreas úmidas costeiras caracterizadas como as áreas finais de rios ou lagos com forte influência das marés e água salina; além destes, os igapós (típicos ambientes Amazônicos) são conceituados como áreas alagáveis ao longo dos rios de água preta e clara, pobres em nutrientes, diferindo da várzea, que está associada a rios de água branca de origem Andina (no caso dos sistemas Amazônicos), ricos em nutrientes. Desta forma, sob risco climático promovido por eventos extremos (MARENGO et al., 2012) e avanço desordenado da ocupação em terras sazonalmente inundáveis aliadas a baixa resiliência humana (LIMA et al., 2020), busca-se entender a geometria espacial das áreas úmidas desta região e como sua dinâmica pode impactar as relações socioeconômicas dos municípios com o estuário amazônico, contribuindo para formulação de propostas voltadas ao gerenciamento costeiro.

Material e Métodos

A área de estudo abrange o limite de 30 municípios, conforme delimitação adotada em Brasil (2018) e define os municípios costeiros do Estado do Pará (Figura 1). O Sistema de Informações Geográficas (SIG) adotado é composto pelo conjunto de dados em formato raster (matricial) e vetorial vinculados as bases de acesso público:

- Limites administrativos e componentes de logística do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).
- Rede de drenagem da Agência Nacional de Águas (ANA).
- Dados do CHIRPS (*Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Stations*), de resolução espacial de 0,05° (~5 km) (FUNK et al., 2015; COSTA et al., 2019). O período adotado foi de 39 anos (1981-2020), tratado no software Excel e interpolado espacialmente em ambiente SIG.

Figura 1 - Municípios costeiros do estado do Pará, segundo classificação proposta pelo Ministério do Meio Ambiente.



Fonte: Brasil (2018)

- Modelo Digital de Elevação SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) com resolução de 30 m (ANDRADES FILHO et al., 2011).
- Temperatura da superfície pelo MODIS *Land Surface Temperature and Emissivity (Monthly L3 Global 0.05° CMG)*, escala 1 km, da plataforma Google Earth Engine. O produto MOD11A1 V6 fornece temperatura diária da superfície terrestre (LST) e valores de emissividade (ee.ImageCollection["MODIS/006/MOD13Q1"]).
- Uso e cobertura da terra do projeto MapBiomass, para o ano de 2020, resolução de 30 m.
- Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) ou Índice de Vegetação Normalizado, obtido a partir da NASA LP DAAC/USGS EROS Center, associado ao produto MOD13Q1.006 Terra Vegetation Indices, para o ano de 2020, com escala de 250 m, da plataforma Google Earth Engine (ee.ImageCollection["MODIS/006/MOD13Q1"]).

O fluxo metodológico estruturado seguiu as etapas de: (1) Estruturação do SIG, com a adequação da Escala e do Datum de referência, com o recorte da base na área do projeto; (2) Zoneamento das áreas topograficamente baixas, tendo como referência Cunha et al. (2015), que propõem uma chave de classificação para as áreas úmidas; (3) Execução de três processamentos específicos (SALLUN et al., 2007) considerando o (i) Modelo Digital de Elevação (com a geração das classes de altimetria, de declividade e de azimutes ou orientação de vertentes), (ii) Geração do quantitativo em área por classe (km²) e (iii) Quantificação da rugosidade do relevo pela relação entre a área real/área plana, gerando o índice de rugosidade do relevo; (3) Análise dos dados mensais do CHIRPS, de 1981 a 2020, com a avaliação dos valores médios, acumulado anual, distribuição espacial, período chuvoso e menos chuvoso; (4) Análise dos dados espaciais do MODIS, com a valoração dos valores médios, distribuição espacial e de máximos/mínimos; (5) Avaliação das classes de uso da terra, com o produto do Projeto MapBiomass, admitindo a classificação para o ano de 2020, de forma complementar foi utilizado o Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI), conforme descrito por Prigent et al (2001) e Silveira e Guasselli (2019).

A elaboração do zoneamento final adotou o processo analítico de álgebra de mapas (por sobreposição). No cruzamento foram definidos como limites extremos: *Áreas de topografias baixas sujeitas diretamente a ação das marés + maior concentração de chuvas + menor variabilidade térmica + maior concentração da vegetação*; e *Áreas de topografias altas +*

menor concentração de chuvas + maior variabilidade térmica + menor concentração da vegetação. As demais categorias foram consideradas intermediárias entre estes extremos.

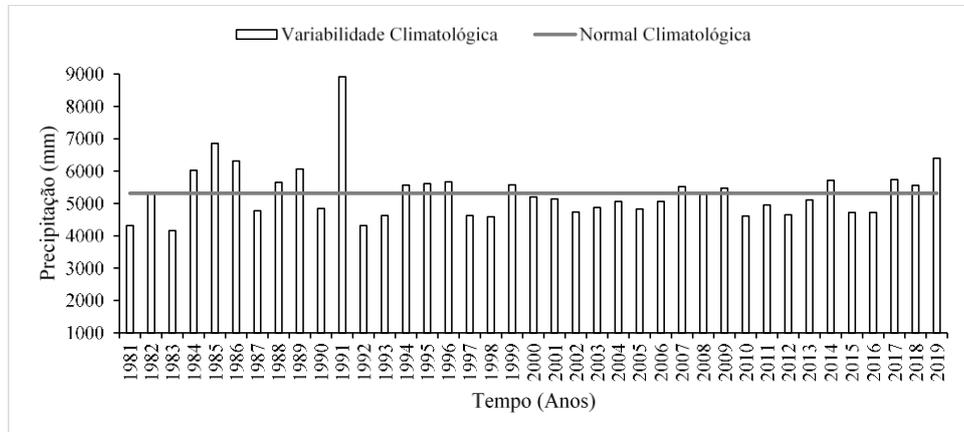
O referencial teórico adotado constou principalmente dos seguintes autores: (a) Delimitação da área de estudo - Gregório e Mendes (2009), Martins e Mendes (2011) e Brasil (2018); (b) Caracterização das áreas úmidas - Prigent et al. (2001), Cunha et al. (2015), Queiroz (2015) e Santos (2016); (c) Geoprocessamento e análise cartográfica - Queiroz Filho e Martinelli (2007), Sallun et al. (2007), Funk et al. (2015) e Silveira e Guasselli (2019).

Resultados e Discussão

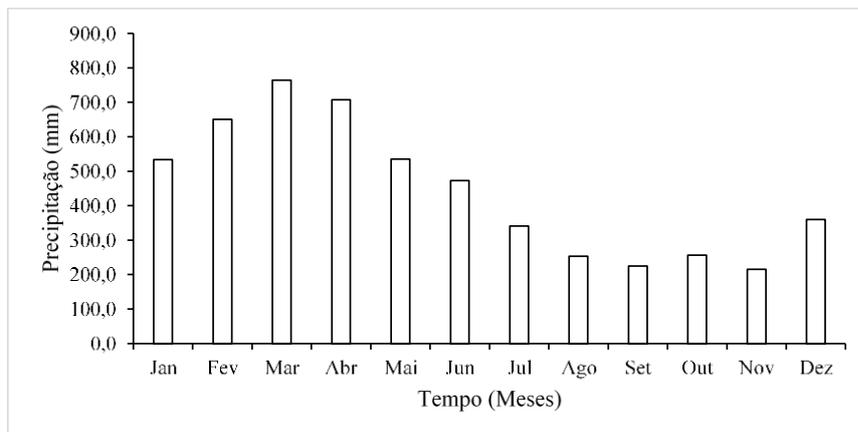
Ao longo da série histórica (Figura 2a) se destaca o ano de 1983 com os menores valores pluviométricos (4.163 mm), provavelmente devido aos efeitos do El Niño classificado como muito forte por Jorge e Lucena (2018).

Sousa et al. (2015) observaram que este El Niño (1982-83) provocou anomalias negativas de precipitação na região do Marajó. Todavia, em 1991 são identificados os maiores montantes pluviométricos (8.913,5 mm). Este pode estar relacionado ao fenômeno do Dipolo do Atlântico negativo (JORGE; LUCENA, 2018) que possui forte influência no regime de chuvas na região costeira paraense (FERREIRA et al., 2020).

Figura 2. (a) Variabilidade de precipitação anual da região nordeste paraense: período de 1981 a 2020. (b) Precipitação pluviométrica mensal região nordeste paraense: período de 1981 a 2020.



(a)



(b)

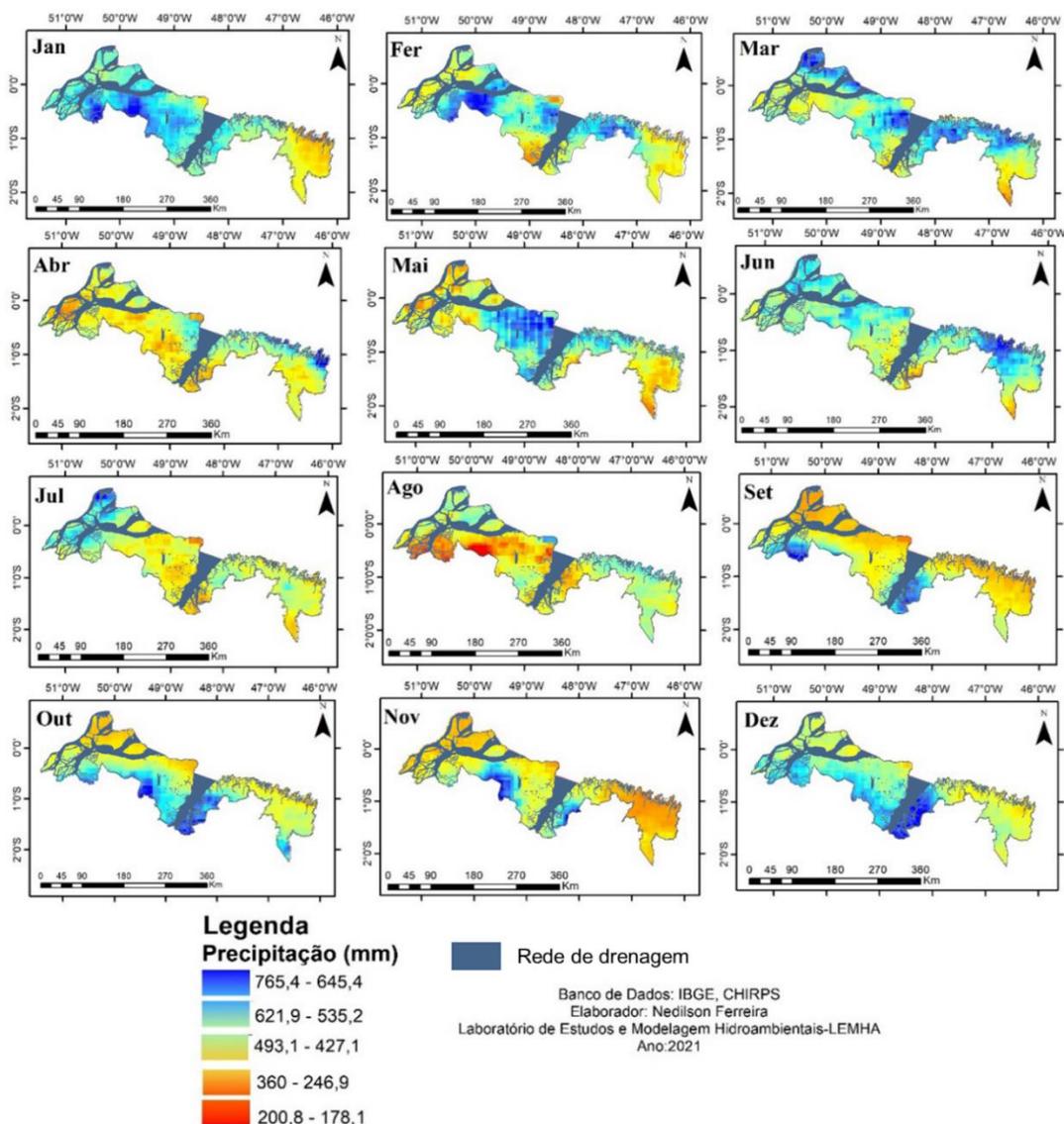
Fonte: CHIRPS.

Na Figura 2b trimestre mais chuvoso é constituído pelos meses de fevereiro (605,4 mm), março (764 mm) e abril (707 mm), com uma redução nos meses seguintes até começar o trimestre menos chuvoso com setembro (224,5 mm), outubro (256,1 mm) e novembro (215,6 mm). Na estação chuvosa (Dez-Mai) identificam-se valores de precipitações variando de 355 mm a 765,5 mm (Figura 3).

A ZCIT é o sistema sinótico responsável pela maior recarga hídrica marcada por este período (SOUSA et al., 2015), porém, sistemas de mesoescala como as brisas marítimas podem contribuir para o transporte de umidade do oceano para a costa paraense, com forte convecção

local (ALBUQUERQUE et al., 2010; SANTOS et al., 2012; GERMANO et al., 2016), além da formação de linhas de instabilidade na região do Marajó (MATOS; COHEN, 2016).

Figura 3. Espacialização pluviométrica sazonal (1981 - 2021), média mensal do período.

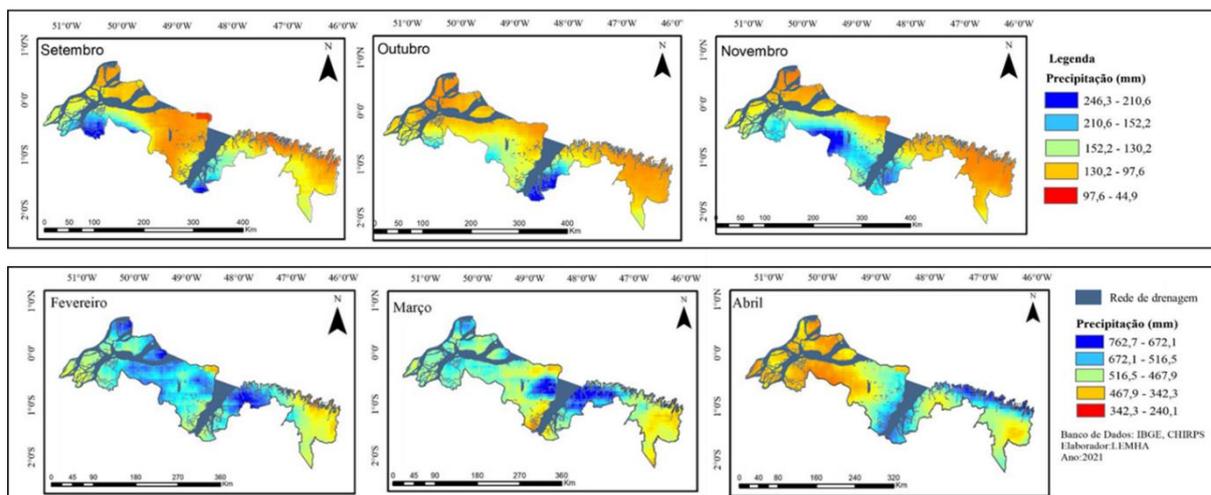


Fonte: CHIRPS.

O período menos chuvoso (Jun-Nov) fica caracterizado com valores de 178,1 mm a 360 mm, sendo a redução dos valores pluviais associada ao deslocamento meridional da ZCIT para o hemisfério norte (FERREIRA; MELLO, 2005). A Figura 4 apresenta o trimestre menos chuvoso (setembro a novembro), com os menores valores encontrados à leste da região. O

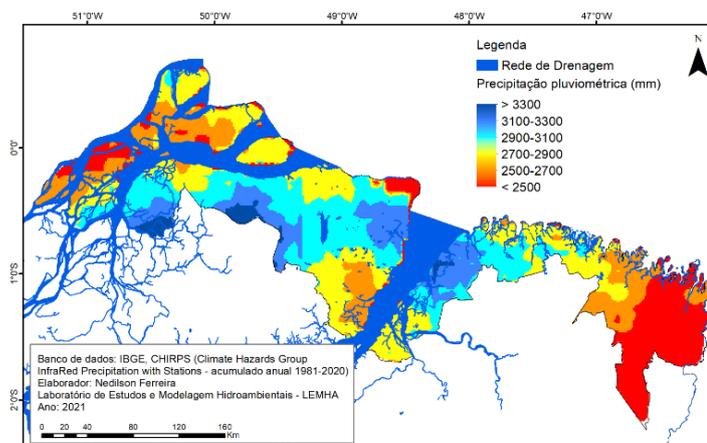
trimestre mais chuvoso ocorre entre os meses de fevereiro e abril, com a precipitação pluviométrica mais alta na parte central, estendendo-se para oeste da região.

Figura 4. Espacialização pluviométrica trimestral (1981 - 2020), média mensal do período: de setembro a novembro - menos chuvoso; de fevereiro a abril - mais chuvoso.



A distribuição espacial da média anual pluviométrica (Figura 5) da região nordeste paraense mostra os maiores valores concentrados ao centro, com valor máximo de 3.584 mm, sendo essa a Região Metropolitana de Belém (RMB). Os valores medianos foram observados aos arredores com médias em torno de 2.979 mm, abrangendo os demais municípios e as ilhas. Os menores quantidade de precipitação foram observados a noroeste com 2.098 mm, localizada na divisa com a região nordeste.

Figura 5. Espacialização pluviométrica anual (1981 - 2020), acumulado anual, média do período.



Fonte: CHIRPS.

Em relação as variáveis obtidas a partir da análise do Modelo Digital de Elevação, com base no proposto por Sallun et al. (2007) e Cunha et al. (2015), têm-se: as classes de altimetria, declividade, azimutes (orientação de vertentes) e a quantificação da rugosidade do relevo, dada pela relação entre a área real/área plana, gerando o índice de rugosidade do relevo.

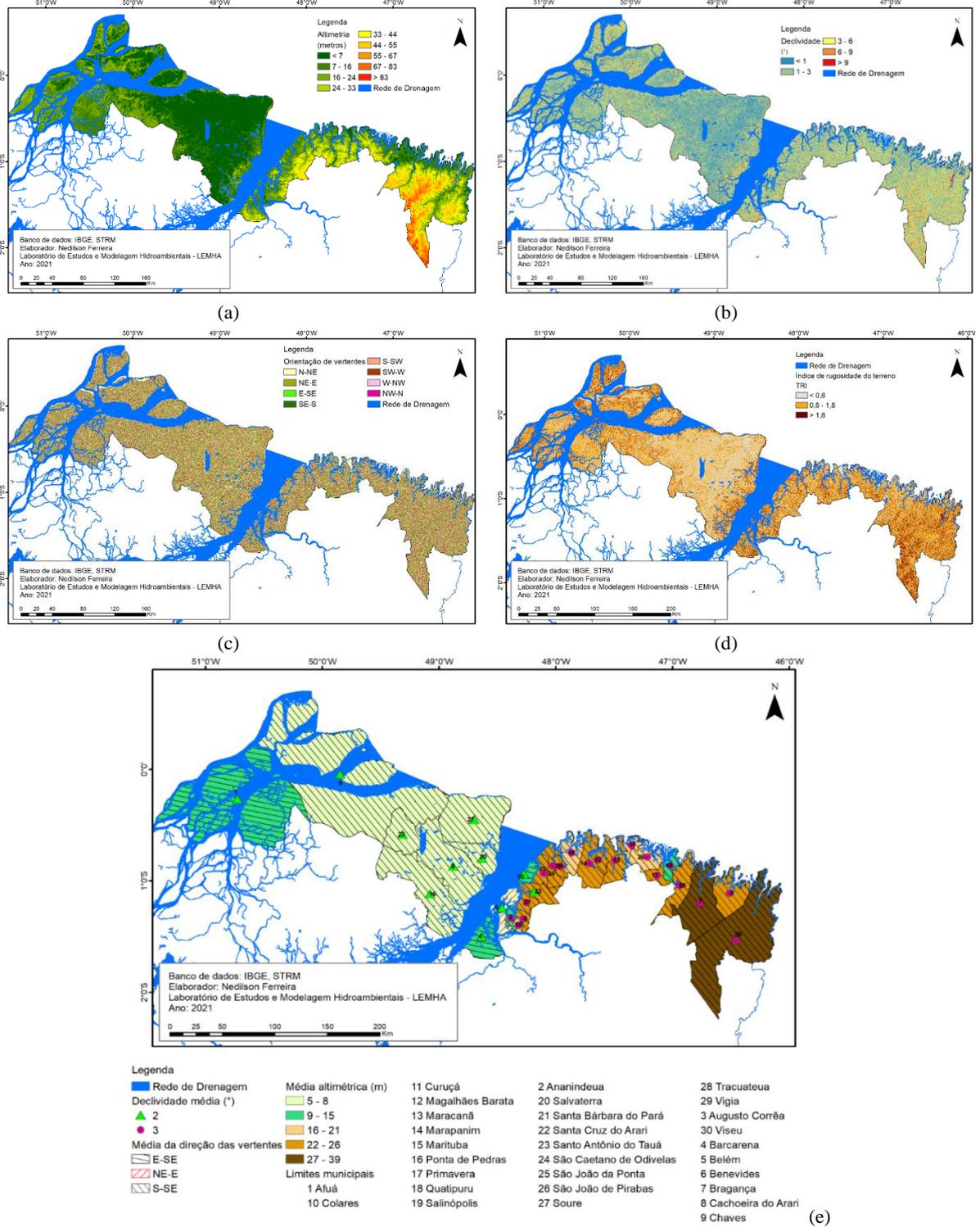
As relações integradas indicam que os valores médios associados aos municípios para a altimetria, declividade e orientação das vertentes, são bastante uniformes, com uma de variação maior na porção oriental, mas com predomínio de relevos suaves, marcados pelas baixas declividades e uma tendência de comportamento na direção S-SE. Estrutura esta, que se reflete no índice de rugosidade do relevo, que indica a região de maior amplitude no mesmo sentido ($> 0,8$) (Tabela 1, Figura 6).

Tabela 1. Relação integrada dos elementos físicos da paisagem por município costeiro.

Municípios	Altimetria (m)	Declividade (°)	Orientação das vertentes		Municípios	Altimetria (m)	Declividade (°)	Orientação das vertentes	
Afuá	11,66	2,00	123	E-SE	Ponta de Pedras	6,92	1,90	150	S-SE
Ananindeua	15,33	2,89	165	S-SE	Primavera	25,91	2,92	174	S-SE
Augusto Corrêa	26,34	2,88	170	S-SE	Quatipuru	13,74	2,63	167	S-SE
Barcarena	12,91	2,13	109	E-SE	Salinópolis	17,13	2,66	163	S-SE
Belém	8,01	1,66	87	NE-E	Salvaterra	7,23	1,88	142	S-SE
Benevides	24,21	3,06	173	S-SE	Sta Bárbara do Pará	22,59	2,78	171	S-SE
Bragança	39,01	2,99	174	S-SE	Sta Cruz do Arari	4,84	1,62	166	S-SE
Cachoeira do Arari	5,34	1,69	146	S-SE	Sto Antônio do Tauá	23,75	2,20	150	S-SE
Chaves	8,05	1,92	135	S-SE	São Caetano de Odivelas	23,03	2,97	171	S-SE
Colares	10,84	1,93	115	E-SE	São João da Ponta	24,01	2,96	174	S-SE
Curuçá	20,37	2,64	171	S-SE	São João de Pirabas	20,90	2,72	167	S-SE
Magalhães Barata	23,35	2,85	170	S-SE	Soure	4,65	1,73	168	S-SE
Maracanã	22,00	2,74	165	S-SE	Tracuateua	24,28	2,51	171	S-SE
Marapanim	22,57	2,76	170	S-SE	Vigia	22,31	2,70	175	S-SE
Marituba	19,64	2,98	169	S-SE	Viseu	36,39	3,44	174	S-SE

As relações associadas à distribuição das chuvas e ao comportamento do relevo, também se refletem na Temperatura de Superfície, em que as áreas de menor aquecimento (26,9 °C - 29,3 °C) localizam-se no setor oeste e na maior parte do litoral. Temperaturas medianas (31,8 °C) podem ser observadas ao longo da área de estudo, mas principalmente na parte leste.

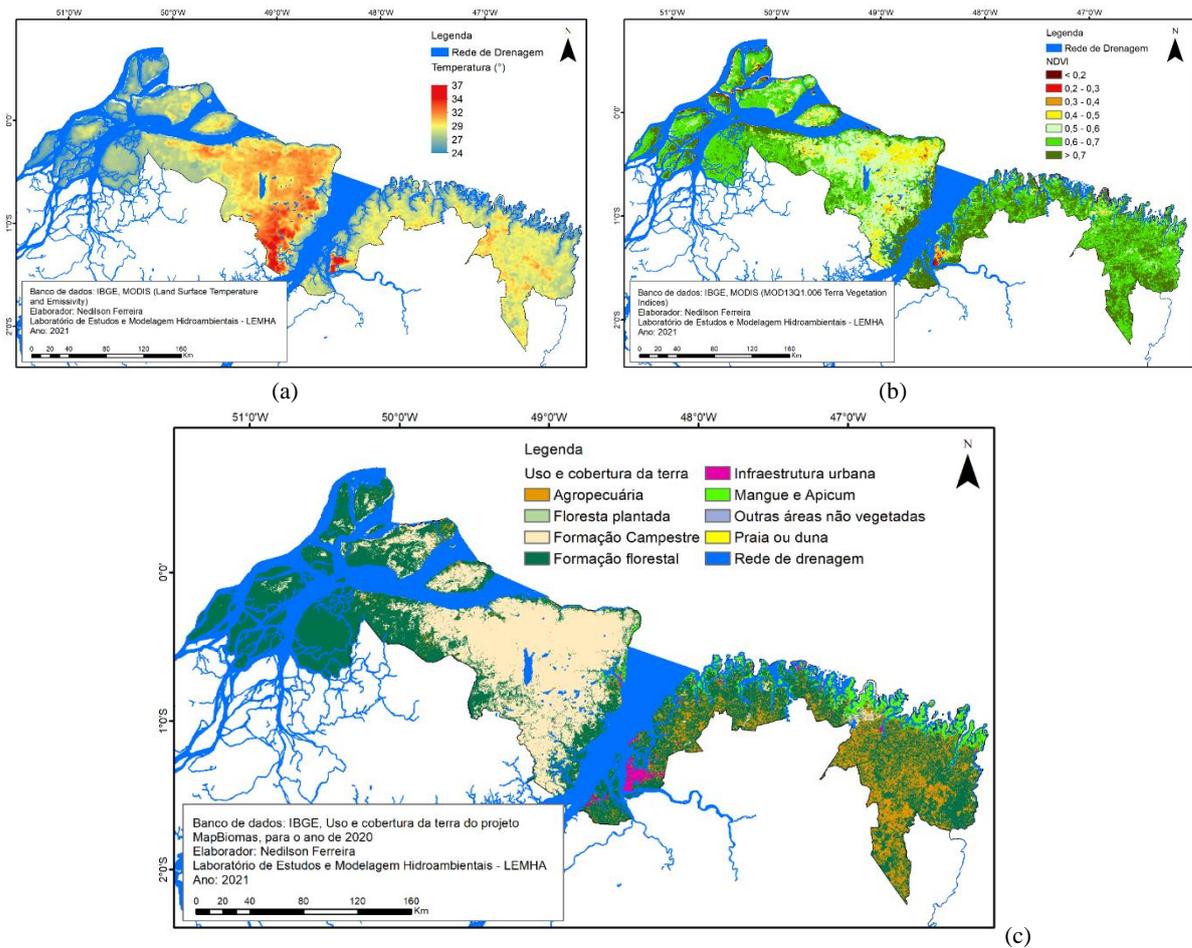
Figura 6. (a) Carta altimétrica. (b) Carta de Declividade. (c) Orientação de vertentes. (d) Índice de Rugosidade do Relevo. (e) Relação integrada, considerando os limites municipais, da Costa Nordeste Paraense.



Fonte: IBGE (2021), STRM.

Os territórios mais quentes com valores extremos (34,2 °C-36,6 °C) foram identificados concentrados ao sul da região do Marajó e na RMB (Figura 7).

Figura 7. (a) Temperatura da Superfície. (b) NDVI associado ao produto MOD13Q1.006 Terra Vegetation Indices. (c) Mapa de uso da terra.



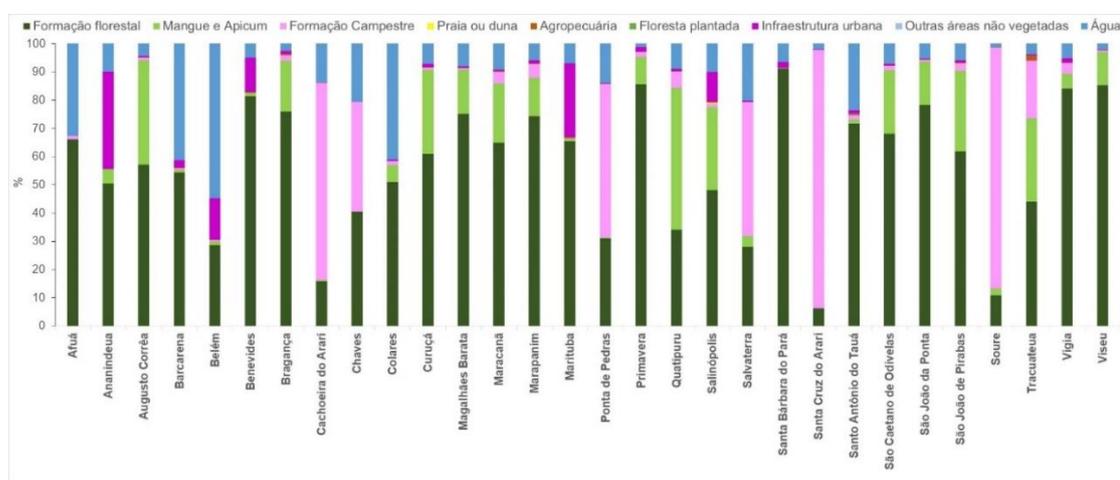
Fonte: (a) IBGE, MODIS; (b) Plataforma Google Earth Engine; (c) Projeto MapBiomass, ano 2020, adaptado para este trabalho.

Na análise dos efeitos do antropismo (Figura 7) foram considerados dois fatores: as alterações de cobertura da terra e o seu reflexo por meio dos índices de vegetação. O uso e ocupação da terra está configurado em 11 (onze) classes, predominando formação campestre ao centro (região do Marajó), pastagem e manguezais ao leste da região. De acordo com os prognósticos de Oliveira et al. (2021), a combinação do processo de savanização amazônica e temperaturas elevadas pode acarretar em cenários de alerta para o bem-estar do ser humano.

Está previsão foi corroborada nos estudos de Anderson et al. (2018), ressaltando a vulnerabilidade da Amazônia a secas extremas. Outro agravante provocado pelo desmatamento não sustentável na região amazônica é a redução da disponibilidade hídrica a longo prazo sob condições das mudanças climáticas (SOUZA JUNIOR et al. 2019). (Figura 8)

Núcleos de florestas foram observados na parte ocidental, indicando a conservação vegetal e contraponto o lado oriental, marcado pela heterogeneidade da paisagem. O NDVI indica valores próximos a 1 nos extremos oriental e ocidental, e realça a área de campos localizada na porção nordeste da ilha do Marajó.

Figura 8. Municípios e áreas de uso e ocupação da terra.

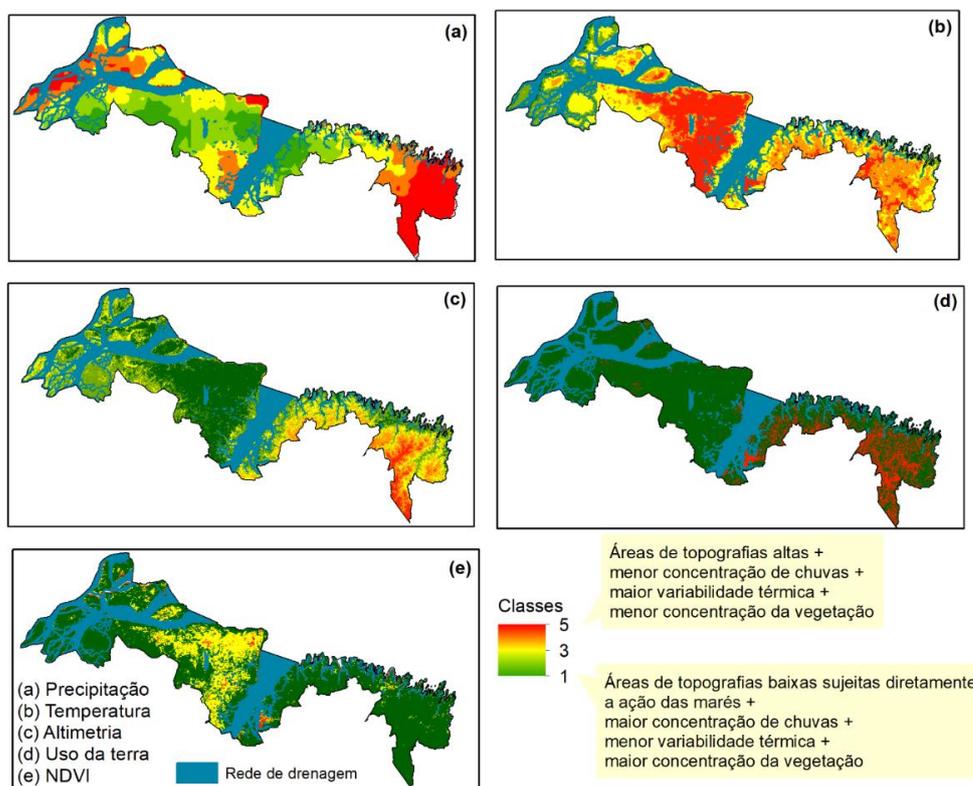


Municípios / Formas de uso e cobertura da terra (%)	Formação florestal	Mangue e Apicum	Formação Campestre	Praia ou duna	Agropecuária	Floresta plantada	Infraestrutura urbana	Outras áreas não vegetadas	Água
Afuá	66,14	0,00	1,09	0,00	0,03	0,00	0,01	0,00	32,72
Ananindeua	50,40	5,17	0,01	0,00	0,03	0,00	34,61	0,00	9,79
Augusto Corrêa	57,04	37,13	0,79	0,07	0,12	0,00	0,50	0,00	4,35
Barcarena	54,33	1,14	0,39	0,00	0,11	0,00	2,85	0,00	41,18
Belém	28,61	1,47	0,36	0,02	0,03	0,00	14,81	0,00	54,71
Benevides	81,39	1,10	0,06	0,00	0,35	0,01	12,12	0,00	4,96
Bragança	75,97	18,00	1,94	0,01	0,43	0,00	1,16	0,00	2,49
Cachoeira do Arari	15,91	0,42	69,78	0,00	0,06	0,00	0,04	0,00	13,79
Chaves	40,47	0,08	38,78	0,00	0,06	0,00	0,00	0,00	20,61
Colares	51,01	5,96	1,56	0,00	0,01	0,00	0,45	0,00	41,01
Curuçá	60,95	29,78	0,81	0,02	0,10	0,00	1,27	0,00	7,07
Magalhães Barata	75,03	15,90	0,37	0,00	0,02	0,00	0,67	0,00	8,01
Maracanã	64,95	20,93	4,08	0,08	0,22	0,00	0,55	0,00	9,19
Marapanim	74,28	13,64	4,78	0,14	0,06	0,00	1,19	0,03	5,87
Marituba	65,50	0,96	0,07	0,00	0,32	0,00	26,12	0,01	7,02
Ponta de Pedras	31,10	0,23	54,37	0,00	0,22	0,00	0,06	0,00	14,02
Primavera	85,53	9,77	1,86	0,00	0,04	0,00	1,69	0,00	1,11
Quatipuru	34,11	50,21	5,77	0,13	0,10	0,00	0,74	0,00	8,93
Salinópolis	48,18	29,34	1,18	0,50	0,32	0,00	10,53	0,00	9,95
Salvaterra	28,03	3,79	47,48	0,02	0,00	0,00	0,43	0,00	20,25
Santa Bárbara do Pará	91,18	0,07	0,08	0,00	0,14	0,00	1,97	0,00	6,56
Santa Cruz do Arari	6,32	0,00	91,65	0,00	0,00	0,00	0,05	0,00	1,97
Santo Antônio do Tauá	71,78	1,33	1,46	0,00	0,42	0,22	1,24	0,01	23,53
São Caetano de Odivelas	68,03	22,57	1,55	0,00	0,12	0,00	0,60	0,00	7,13

São João da Ponta	78,24	15,47	0,61	0,00	0,11	0,00	0,36	0,00	5,21
São João de Pirabas	61,86	28,59	2,44	0,20	0,07	0,00	0,94	0,00	5,91
Soure	10,88	2,42	85,13	0,03	0,00	0,00	0,23	0,00	1,30
Tracuateua	44,00	29,55	20,43	0,03	1,82	0,00	0,38	0,00	3,78
Vigia	84,13	5,31	3,77	0,00	0,07	0,00	1,57	0,02	5,13
Viseu	85,22	11,84	0,58	0,01	0,11	0,00	0,19	0,00	2,05

Nos municípios, o reflexo é o maior percentual de formações florestais em 33% dos componentes da região, destacando os marajoaras de Cachoeira do Arari, Ponta de Pedras, Santa Cruz do Arari e Soure, onde ocorre o domínio de formações campestres. Em Quatipuru, as áreas são caracterizadas por manguezais e apicuns. Belém é uma situação a parte, pois cerca de metade do município está sob a influência das águas do rio Guamá e das baías do Guajará e do Marajó. Com base nos critérios adotados foi estabelecida a hierarquia de classificação que deu apoio para o processo de elaboração da álgebra de mapas final (Figura 9).

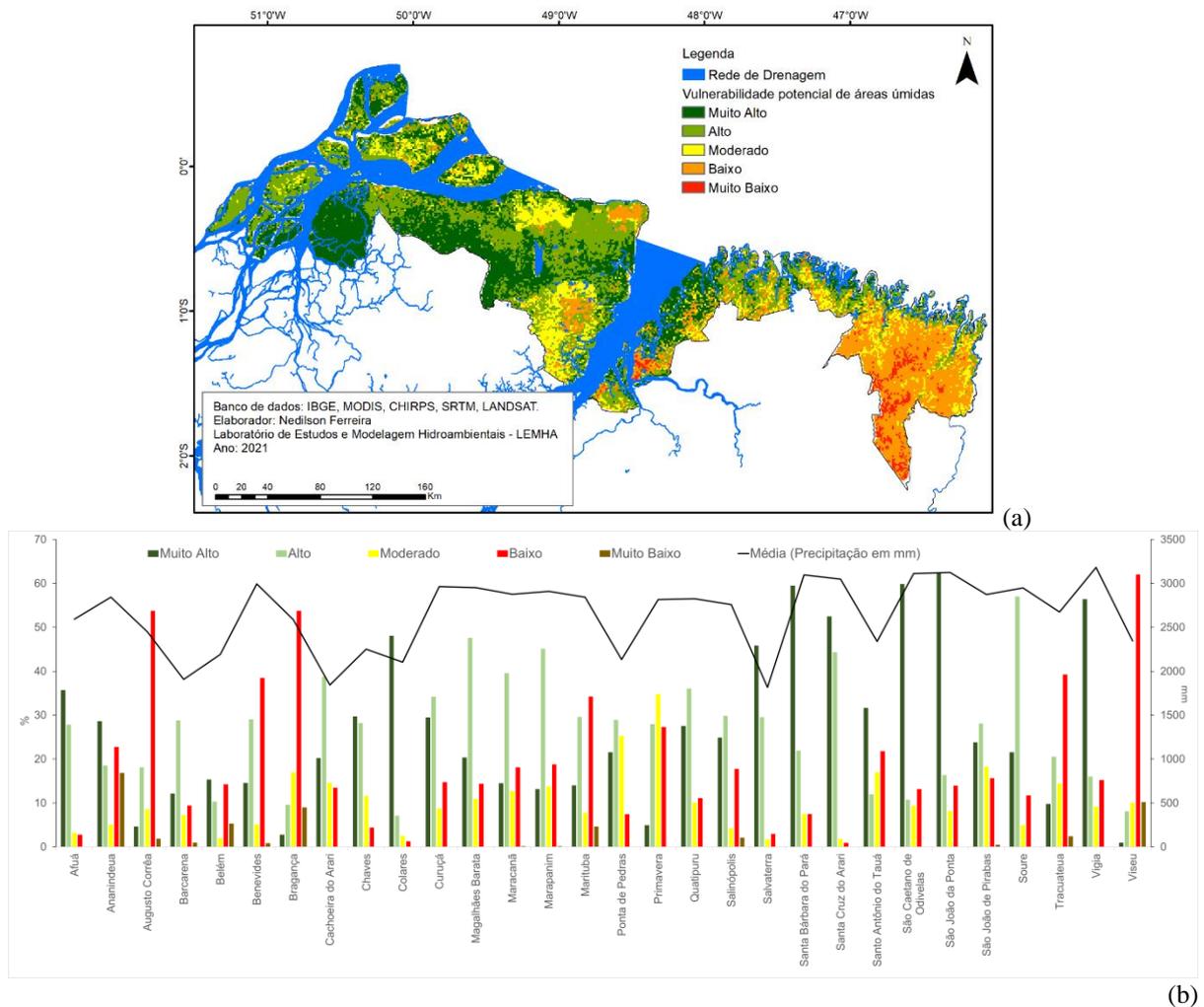
Figura 9. Classes adotadas por categoria.



As definições adotadas indicaram (Figura 10): (1) *Áreas de topografias baixas sujeitas diretamente a ação das marés + maior concentração de chuvas + menor variabilidade térmica + maior concentração da vegetação = associadas como a de maior potencial para a formação de áreas úmidas e mais vulneráveis às alterações impostas pelas formas de uso da terra;* (2)

Áreas de topografias altas + menor concentração de chuvas + maior variabilidade térmica + menor concentração da vegetação = associadas como a de menor potencial para a formação de áreas úmidas, e mais afetadas pelas alterações impostas pelas formas de uso da terra.

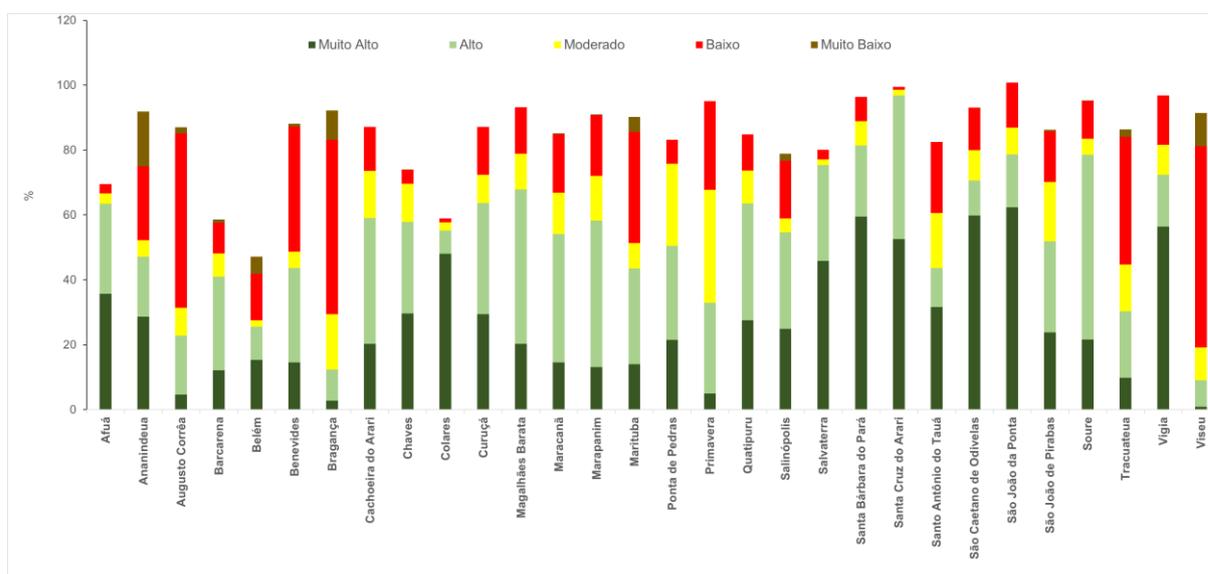
Figura 10. (a) Zonas de áreas úmidas e sua vulnerabilidade. (b) Padrão das classes e precipitação pluviométrica (acumulado anual).



Os resultados obtidos traduzem um ambiente de alta sensibilidade ambiental (ALVES; EL-ROBRINI, 2006; BARBOSA et al., 2007; SOUZA FILHO et al., 2009) em função da integração dos efeitos dos fatores biofísicos com a dinâmica de uso da terra local. Mansur et al. (2016) detectou, na região estuarina onde está contida a RMB, vários pontos com alta vulnerabilidade socioeconômica exposta a eventuais inundações, sugerindo que uma das razões é a ocupação não planejada.

É verificado que os municípios de Santa Bárbara do Pará, Santa Cruz do Arari, São Caetano de Odivelas, São João da Ponta, Soure, Vigia, Magalhães Barata, Maracanã, Marapanim, Santa Cruz do Arari e Soure tem predomínio de áreas de muito alto (> 50%) e alto (> 40%) potencial para formação de áreas úmidas. O que indica a forte influência dos localizados no Marajó e na zona litorânea como mantenedores destes ambientes (Figura 11).

Figura 11. Distribuição das classes por município: Muito Alto (MA), Alto (A), Moderado (Md), Baixo (B) e Muito Baixo (MB).



Municípios / Classes (%)	MA	A	Md	B	MB	Municípios / Classes (%)	MA	A	Md	B	MB
Afuá	35,69	27,82	3,20	2,77	0,00	Ponta de Pedras	21,54	28,94	25,31	7,45	0,00
Ananindeua	28,66	18,54	5,06	22,76	16,86	Primavera	4,97	27,95	34,78	27,33	0,00
Augusto Corrêa	4,67	18,11	8,62	53,75	1,90	Quatipuru	27,57	36,05	10,07	11,13	0,00
Barcarena	12,14	28,81	7,23	9,44	0,98	Salinópolis	24,86	29,83	4,26	17,76	2,13
Belém	15,31	10,31	1,97	14,25	5,31	Salvaterra	45,81	29,55	1,75	2,97	0,00
Benevides	14,54	29,08	5,13	38,48	0,86	Santa Bárbara do Pará	59,48	21,94	7,51	7,51	0,00
Bragança	2,80	9,60	17,01	53,75	9,00	Santa Cruz do Arari	52,51	44,31	1,79	0,90	0,00
Cachoeira do Arari	20,26	38,75	14,61	13,47	0,00	Santo Antônio do Tauá	31,67	11,95	17,03	21,81	0,00
Chaves	29,69	28,20	11,69	4,38	0,01	São Caetano de Odivelas	59,87	10,73	9,34	13,15	0,00
Colares	48,09	7,11	2,51	1,25	0,00	São João da Ponta	62,31	16,40	8,20	13,94	0,00
Curuçá	29,45	34,20	8,79	14,72	0,00	São João de Pirabas	23,79	28,11	18,26	15,62	0,48
Magalhães Barata	20,33	47,59	10,91	14,38	0,00	Soure	21,59	57,00	4,95	11,69	0,06
Maracanã	14,52	39,58	12,73	18,10	0,20	Tracuateua	9,81	20,54	14,43	39,23	2,41
Marapanim	13,18	45,11	13,77	18,76	0,20	Vigia	56,40	16,00	9,20	15,20	0,00
Marituba	14,01	29,57	7,78	34,24	4,67	Viseu	0,94	8,11	10,11	62,05	10,21

O histórico de ocupação desta região é longo, com um dos municípios mais antigos de fundação do estado (Bragança) e uma tradição local de exploração dos recursos extrativistas (PEREIRA et al., 2006; ROCHA et al., 2019). Estes cenários apontam que as áreas úmidas instaladas se encontram sobre

uma constante pressão de exploração do seu potencial natural, seja florestal, seja de recursos ambientais das áreas de manguezais, o que reforça a implantação de políticas públicas de gerenciamento costeiro, capazes de criar mecanismos de monitoramento integrado.

Rocha et al. (2019) elencam dois fatores como essenciais para esta discussão: a emergência de estruturas espaciais verdadeiras vinculadas à “faixas geoeconômicas” da zona de planícies aluviais e de planícies de mangue (predominantemente, do extrativismo e pesca) e da planície costeira, com os minifúndios da agricultura familiar; e os processos sociais, econômicos e políticos ligados a urbanização-metropolização e litoralização, materializados como vetores de desenvolvimento tecno-industrial (com o avanço da atividade industrial e portuária) e tecno-ecológico (ligados as ações vinculadas à conservação ambiental e à afirmação territorial de populações tradicionais).

Os municípios de maior destaque indicados pelo estudo, são os marajoaras e os atlânticos mais próximos dos limites do estuário amazônico, o que reforça as características discutidas por Gregório e Mendes (2009), Martins e Mendes (2011) e Brasil (2018), no referente aos elementos físicos da paisagem; e para os efeitos da precipitação pluviométrica na região, segundo Ferreira et al. (2015) e Ferreira et al. (2020). A frequência e importância das chuvas é um fator destacado por Prigent et al. (2001), Cunha et al. (2015), Queiroz (2015) e Santos (2016), pois a composição do quantitativo da precipitação, e sua relação com as características locais de escoamento e retenção de água, favorecem a manutenção e frequência das áreas úmidas em determinada região.

Conclusão

A região de estudo constitui uma expressiva área de zona costeira, com cerca de 50.437 km², onde aproximadamente 26.062 km² (51,67%) representam áreas vulneráveis, por sua caracterização como áreas úmidas. Estas, por responderem à ação das águas, podem sofrer as consequências: dos efeitos da variabilidade climática, principalmente associada à frequência e intensidade das chuvas; das alterações no regime hídrico das bacias hidrográficas componentes; e dos efeitos de mudanças no comportamento das marés.

As formas de uso da terra têm afetado os tipos de cobertura, que na região são importantes para manutenção do comportamento como zona úmida, principalmente nas áreas de floresta e manguezais. Assim, o gerenciamento costeiro torna-se necessário para equalizar tais questões que associem o potencial econômico natural da região, a preservação dos ecossistemas de maior sensibilidade e a manutenção das condições necessárias para o equilíbrio hidrológico dos ambientes formadores.

Referências

- ALBUQUERQUE, M. F.; SOUZA, E. B.; OLIVEIRA, M. C. F.; JÚNIOR, J. A. S. 2010. Precipitação nas mesorregiões do estado do Pará: climatologia, variabilidade e tendências nas últimas décadas (1978-2008). **Revista Brasileira de Climatologia**, 6:151-168.
- ALCÂNTARA, C. R.; SILVA DIAS, M. A. F.; SOUZA, E. P.; COHEN, J. C. P. 2011. Verification of the role of low level jets in Amazon squall lines. **Atmospheric Research**, 100:36-44.
- ALCÂNTRA, E. H. 2004. Mudanças climáticas, incertezas hidrológicas e vazão fluvial: o caso do estuário do rio anil. **Caminhos de Geografia**, 8(12):158-173.
- ALVES, M. A. M. S.; EL-ROBRINI, M. 2006. Morphodynamics of the Macrotidal Beach: Ajuruteua, Bragança North Brazil. **Journal of Coastal Research**, SI 39:1848-1850.
- ANA. 2017. Agência Nacional de Águas. **Estado do Pará: Domínio dos corpos hídricos superficiais - mapa temático**. Brasília: Agência Nacional de Águas.
- ANDERSON, L. O.; RIBEIRO NETO, G.; CUNHA, A. P.; FONSECA, M. G.; MOURA, Y. M.; DALAGNOL, R.; WAGNER, F. H.; ARAGÃO, L. E. O. C. 2018. Vulnerability of Amazonian forests to repeated droughts. **Philosophical Transactions of the Royal Society B**, 373:1-13.
- ANDRADES FILHO, C. O.; ROSSETTI, D. F.; ZANI, H. 2011. Hipsometria derivada de MDE-SRTM aplicada na distinção entre Formação Barreiras e os Sedimentos Pós-Barreiras na Bacia Paraíba. In: Anais do Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 15, Curitiba (PR), 3443-3443.
- BARBOSA, V. M.; GREGÓRIO A. M. S.; BUSMAN, D. V.; COSTA, R. A. A. M.; SOUSA E FILHO, P. W. M.; PEREIRA, L. C. C. 2007. Estudo morfodinâmico durante uma maré equinocial de sizígia em uma praia de macromaré do litoral Amazônico (Praia de Ajuruteua-Pa, Brasil). **Boletim Paranaense de Geociências**, 60-61: 31-43.
- BRASIL. 2018. **Municípios Costeiros do Estado do Pará**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente.
- CHAVES, P. M. 2011. **Estudo observacional sobre os eventos de seca meteorológica e hidrológica na região de Marabá-PA no Sudeste da Amazônia Oriental**. 133f. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Pará.
- COHEN, J. C. P.; FITZJARRALD, D. R.; D'OLIVEIRA, F. A. F.; SARAIVA, I.; BARBOSA, I. R. S.; GANDU, A. W. et al. 2014. Radar-observed spatial and temporal rainfall variability near the Tapajós-Amazon confluence. **Revista Brasileira de Meteorologia**, 29:23-30.
- COSTA, J.; PEREIRA, G. SIQUIERA, M. E.; CARDOZO, F.; SILVA, V. V. 2019. Validação dos dados de precipitação estimados pelos CHIRPS para o Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 24:228-243.
- COUTINHO, E. C.; ROCHA, E. J. P.; LIMA, A. M. M.; RIBEIRO, H. M. C.; GUTIERREZ, L. A. C. L.; BARBOSA, A. J. S.; PAES, G. K. A. A.; BISPO, C. J. C.; TAVARES, P. A. 2017. Riscos socioeconômicos e ambientais em municípios banhados pelos afluentes do Rio Amazonas. **Revista Ambiente e Água**, 12:814-828.
- CUNHA, C. N.; PIEDADE, M. T. F.; JUNK, W. J. 2015. **Classificação e delineamento das áreas úmidas brasileiras e de seus macrohabitats**. Cuiabá: EdUFMT.
- DE SOUSA, A. M. L.; ROCHA, E. J. P.; VITORINO, M. I.; SOUZA, P. J. O. P.; BOTELHO, M. N. 2015. Variabilidade espaço-temporal da precipitação na Amazônia durante eventos ENOS. **Revista Brasileira de Geografia Física**, 8(1):13-24.

- DYER, K. R. 1995. Sediment transport processes in estuaries. In: PERILLO, G. M. E. (Ed.). **Geomorphology and Sedimentology of Estuaries: Developments in Sedimentology**. New York: Elsevier Science.
- FERREIRA, A. G.; MELLO, N. G. S. 2005. Principais sistemas atmosféricos atuantes sobre a região nordeste do Brasil e a influência dos oceanos Pacífico e Atlântico no clima da região. **Revista Brasileira de Climatologia**, 1:15-28.
- FERREIRA, D. B. S.; DE SOUZA, E. B.; DE MORAES, B. C.; FILHO, L. G. M. 2015. Spatial and temporal variability of rainfall in Eastern Amazon during the rainy season. **The Scientific Word Journal**, ID 209783:1-9.
- FERREIRA, D. B. S.; DE SOUZA, E. B.; OLIVEIRA, J. V. 2020. Identificação de extremos de precipitação em municípios do Estado do Pará e sua relação com os modos climáticos atuantes nos oceanos Pacíficos e Atlântico. **Revista Brasileira de Climatologia**, 16:197-222.
- FIGUEROA, S. N.; NOBRE, C. A. 1990. Precipitations distribution over central and western tropical South América. **Climanálise - Boletim de Monitoramento e Análise Climática**, 36-45.
- FUNK, C.; PETERSON, P.; LANDSFELD, M.; PEDREROS, D.; VERDIN, J.; SHUKLA, S.; HUSAK, G.; ROWLAND, J.; HARRISON, L.; HOELL, A.; MICHAELSEN, J. 2015. The climate hazards infrared precipitation with stations – a new environmental record for monitoring extremes. **Scientific Data**, 2:150066.
- GERMANO, M. F.; VITORINO, M. I.; COSTA, G. B.; SOUZA, A. M. L.; SOUTO, J. I. O. 2016. Variabilidade atmosférica da precipitação associada com as circulações de brisas marítimas e terrestres no nordeste do estado do Pará, Brasil. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi - Ciências e Natureza**, 11(3):303-312.
- GREGÓRIO, A. M. S.; MENDES, A. C. 2009. Batimetria e sedimentologia da Baía de Guajará, Belém, Estado do Pará, Brasil. **Amazônia Ciência & Desenvolvimento**, 5:53-72.
- GREGÓRIO, A. M. S.; MENDES, A. C. 2009a. Characterization of sedimentary deposits at the confluence of two tributaries of the Pará River estuary (Guajará Bay, Amazon). **Continental Shelf Research**, 29:609-618.
- JORGE, R. L. O.; LUCENA, D. B. 2018. Eventos extremos anuais de precipitação em Mauriti - CE. **Ciência e Natura**, 40(e65):1-10.
- LATRUBESSE, E. M.; COZZUOL, M.; SILVA-CAMINHA, S. A. F.; RIGSBY, C. A.; ABSY, M. L.; JARAMILLO, C. 2010. The Late Miocene paleogeography of the Amazon Basin and the evolution of the Amazon River system. **Earth and Science Reviews**, 99:99-124.
- LIMA, A. C. B.; ALMEIDA, O.; PINEDO-VASQUEZ, M.; LEE, T. M.; RIVERO, S.; SCHRAMSKI, S.; MANSUR, A. V. 2020. Climate hazards in small and medium cities in the Amazon Delta and Estuary: challenges for resilience. **Environmental & Urbanization**, 32(1):195-212.
- SACEK, V. 2014. Drainage reversal of the Amazon River due to the coupling of surface and lithospheric processes. **Earth and Planetary Science Letters**, 401:301-312.
- MANSUR, A. V.; BRONDÍZIO, E. S.; ROY, S.; HETRICK, S.; VOGT, N. D.; NEWTON, A. 2016. An assessment of urban vulnerability in the Amazon Delta and Estuary: a multi-criterion index of flood exposure, socio-economic conditions and infrastructure. **Sustainability Science**, 11:625-643.
- MARENGO, J. A., TOMASELLA, J., SOARES, W. R., ALVES, L. M., NOBRE, C. A. 2012. Extreme climatic events in the Amazon basin climatological and hydrological context of recent floods. **Theoretical and Applied Climatology**, 107(1/2):73-85.
- MARINHA DO BRASIL. 2017. **Cartas Náuticas**. Da Ilha do Capim à Ilha da Conceição. Rio Pará, n. 305. Disponível em www.marinha.mil.br/chm/dados-do-segnav/cartas-raster.

- MARTINS, S. E. M.; MENDES, A. C. 2011. Caracterização de depósitos sedimentares recentes da porção superior da Baía de Marajó (margem leste do estuário do Rio Pará, Amazônia). **Pesquisas em Geociências**, 38(2):168-180.
- MATOS, A. P.; COHEN, J. C. P. 2016. Faixa de circulação e precipitação da brisa do rio na margem leste da baía do Marajó. **Ciência & Natura**, 38:21-27.
- MORAES, B. C.; COSTA, J. M. N.; COSTA, A. C. L.; COSTA, M. H. 2005. Variação espacial e temporal da precipitação no estado do Pará. **Acta Amazônica**, 35(2):207-214.
- MORAES, D.; FILHO, M. 2018. Contribuição das chuvas do período da tarde em Belém e possíveis relações com a normal climatológica. **Revista Brasileira de Climatologia**, 14(23):17-32.
- MORAES, D.; FILHO, M. 2018. Contribuição das chuvas do período da tarde em Belém e possíveis relações com a normal climatológica. **Revista Brasileira de Climatologia**, 23:17-32.
- OLIVEIRA, B. F. A.; BOTTINO, M. J.; NOBRE, P.; NOBRE, C. A. 2021. Deforestation and climate change are projected to increase heat stress risk in the Brazilian Amazon. **Communications Earth & Environment**, 2(207):1-8.
- PEEL, M. C.; FINLAYSON, B. L.; MCMAHON, T. A. 2007. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. **HESS**, 11:1633-1644.
- PEREIRA, L. C. C.; RIBEIRO, M. J. S.; GUIMARÃES, D. O.; SOUZA FILHO, P. W. M.; COSTA, R. M. 2006. Formas de uso e ocupação na praia de Ajuruteua-Pará (Brasil). **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, 13:19-30.
- PRIGENT, C.; MATTHEWS, E.; AIRES, F.; ROSSOW, W. B. 2001. Remote sensing of global wetland dynamics with multiple satellite data sets. **Geophysical Res. Letters**, 28(24): 4631-4634.
- QUEIROZ FILHO, A. P.; MARTINELLI, M. 2007. Cartografia de análise e de síntese na Geografia. **Boletim Paulista de Geografia**, 87:7-44.
- QUEIROZ, M. L. 2015. **Nascentes, Veredas e Áreas Úmidas: Revisão Conceitual e Metodologia de Caracterização e Determinação em Estudo de Caso na Estação Ecológica de Águas Emendadas - Distrito Federal**. 161f. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas, Universidade de Brasília, Brasília-DF.
- ROCHA, G. M.; SOARES, D. A. S.; MORAES, S. C. 2019. Dinâmicas Territoriais na Zona Costeira do Estado do Pará, Amazônia Brasileira. **Confins**, 42:1-11.
- SALDANHA, D. S.; COSTA, D. F. S. 2019. Classificação dos serviços ecossistêmicos prestados pelas áreas úmidas na zona estuarina do rio Piancó-Piranhas-Açu (Nordeste, Brasil). **Revista Ateliê Geográfico**, 13(3):263-282.
- SALLUN, A. E. M.; SUGUIO, K.; SALLUN-FILHO, W. 2007. Geoprocessamento para cartografia do alogruppo Alto Rio Paraná (SP, PR e MS). **Revista Brasileira de Cartografia**, 59(3):289-299.
- SANTOS, S. R. Q.; SANSIGOLO, C. A.; NEVES, T. T. A. T.; SANTOS, P. P. 2016. Variabilidade sazonal da precipitação na Amazônia: Validação da série de precipitação mensal do GPCC. **Revista Brasileira de Climatologia**, 18:256-275.
- SANTOS, S. R. Q.; VITORINO, M. I.; BRAGA, C. C.; CAMPOS, T. L. O. B.; SANTOS, A. P. P. 2012. O efeito de brisas marítimas na cidade de Belém-PA: utilizando análise em multivariada. **Revista Brasileira de Geografia Física**, 5:1110-1120.
- SANTOS, V. F. Dinâmica de inundação em áreas úmidas costeiras: zona urbana de Macapá e Santana, costa amazônica, Amapá. 2016. **Rev. Elet. de Humanidades**, 9(3):121-144.
- SILVEIRA, G. V.; GUASSELLI, L. A. 2019. Mapeamento das inundações a partir de NDWI no município de Itaqui, rio Uruguai - RS. **Geociências**, 38(2):521-534.

- SOARES JÚNIOR, A. V.; COSTA, J. B. S.; HASUI, Y. 2008. Evolução da Margem Atlântica Equatorial do Brasil: três fases distensivas. **Geociências**, 27(4):427-437.
- SOUZA FILHO, P. W. M.; SILVA, C. G.; MIRANDA, F. P.; BORGES, H. V. 2009. Sensibilidade ambiental ao derramamento de óleo na zona costeira e marinha amazônica: reconhecimento, princípios e aplicações. **Revista Brasileira de Geofísica**, 27(suppl 1):5-6.
- SOUZA JUNIOR, C. M.; KIRCHHOFF, F. T.; OLIVEIRA, B. C.; RIBEIRO, J. G.; SALES, M. H. 2019. Long-Term annual surface water change in the Brazilian Amazon biome: potential links with deforestation, infrastructure development and climate change. **Water**, 11(3):1-18.
- ZOLNERKEVIC, I. 2014. O passado remoto de um grande rio: Erosão dos Andes pode ter unido antigas bacias hidrográficas e formado o Amazonas. **Revista Pesquisa FAPESP**, 223:54-57.

Recebido em 06 de janeiro de 2023.

Aceito em 13 de março de 2023.

Publicado em 10 de abril de 2023.