

# **MAPEAMENTO DAS ÁREAS ÚMIDAS NA AMAZÔNIA ORIENTAL: ANÁLISE MULTITEMPORAL APLICADA AO BAIXO CURSO DA BACIA HIDROGRÁFICA RIO PINDARÉ**

Débora Frazão Ferreira<sup>1</sup>  
Jackson Sousa dos Santos<sup>2</sup>

## **Resumo**

As áreas úmidas desempenham papel estratégico na manutenção dos ciclos hidrológicos, na conservação da biodiversidade e na provisão de serviços ecossistêmicos. No entanto, encontram-se sob crescente pressão de mudanças climáticas e transformações no uso da terra. Este estudo analisou a dinâmica espacial e temporal das áreas úmidas no baixo curso da bacia hidrográfica do rio Pindaré (Maranhão), entre 2017 e 2024, por meio de imagens Sentinel-1 processadas no Google Earth Engine e da aplicação do índice RVImod. Os resultados revelaram forte correlação entre a variabilidade pluviométrica e a extensão das áreas alagadas, com destaque para 2018, 2020 e 2022, anos marcados por chuvas regulares e maior persistência hídrica. Em contraste, 2017, 2023 e 2024 registraram retrações significativas, associadas a déficits de precipitação e à atuação do fenômeno El Niño. A análise multitemporal evidenciou uma tendência de declínio das zonas úmidas ao longo da série, com redução aproximada de 24%, indicando vulnerabilidade crescente diante de alterações climáticas e pressões antrópicas. Os achados reforçam a relevância do pulso de inundação como regulador ecológico e apontam a necessidade de políticas públicas integradas de conservação, monitoramento contínuo via sensoriamento remoto e estratégias de gestão sustentável voltadas à resiliência socioambiental da Amazônia Oriental.

**Palavras-chave:** Amazônia Oriental, Áreas Úmidas, Sensoriamento Remoto, Variabilidade Climática.

## **INTRODUÇÃO**

Diante da constante evolução técnico-científica e do crescimento populacional, as problemáticas ambientais tornaram-se cada vez mais evidentes e complexas (Cunha, 2005; Sachs, 2008). À medida que a tecnologia avança e a população mundial se expande, intensificam-se os impactos das atividades humanas sobre o meio ambiente, manifestando-se por meio da poluição, da degradação dos ecossistemas e das mudanças climáticas (MEA, 2005; IPCC, 2021). Desde a década de 1970 — marco importante para a conscientização ambiental — a sociedade passou a reconhecer, de forma mais urgente, a necessidade de preservação ambiental (Carson, 1962; Barbier, 1987). Esse período foi caracterizado pelo fortalecimento de um movimento global em torno da sustentabilidade e da proteção dos recursos naturais, o que impulsionou a criação de tratados internacionais, como a Convenção de Ramsar (1971) e a Conferência de Estocolmo (1972), bem como o desenvolvimento de políticas públicas e a adoção de práticas sustentáveis (Leff, 2001).

---

<sup>1</sup> Licenciada e Mestranda em Geografia pela Universidade Estadual do Maranhão (UEMA).

<sup>2</sup> Licenciado e Mestre em Geografia pela Universidade Estadual do Maranhão (UEMA). Doutorando em Geografia pela Universidade Federal do Pará (UFPA).

A crescente preocupação ambiental reflete uma compreensão mais profunda dos limites planetários (Rockström et al., 2009) e da necessidade de equilibrar o progresso tecnológico e econômico com a conservação dos recursos naturais. Atualmente, os desafios ambientais são amplamente reconhecidos como prioridade global, exigindo ações coordenadas e inovadoras para enfrentar as crises ecológicas e promover um futuro sustentável (UNEP, 2019).

As áreas úmidas constituem ecossistemas de elevada importância ecológica, hidrológica e socioeconômica. Sua relevância manifesta-se na regulação do ciclo hidrológico, na recarga de aquíferos, na conservação da biodiversidade, no sequestro de carbono e na provisão de múltiplos serviços ecossistêmicos essenciais à vida humana e à estabilidade ambiental (MMA, 2022; RAMSAR, 2018). Apesar dessa relevância, esses ambientes foram historicamente marginalizados nas políticas de ordenamento territorial e conservação, figurando atualmente entre os ecossistemas mais degradados do planeta (Junk et al., 2014; Costanza et al., 2014).

Na região amazônica e em áreas adjacentes, esses ambientes ocorrem em diferentes configurações, como várzeas, campos alagáveis, igarapés e lagos interligados por sistemas de drenagem natural, frequentemente sujeitos a variações sazonais marcadas por ciclos de cheias e secas (Junk; Piedade; Schöngart, 2015). No estado do Maranhão, particularmente no baixo curso da bacia hidrográfica do rio Pindaré, observa-se uma zona de transição entre os domínios do Cerrado e da Floresta Ombrófila Densa, caracterizada pela presença de extensas áreas sazonalmente alagáveis (IBGE, 2019; Barros; Silva; Sousa, 2021). Contudo, esses ambientes vêm sendo crescentemente pressionados por mudanças no uso e cobertura da terra, alterações no regime de precipitação e intervenções antrópicas que afetam sua extensão, funcionamento e conectividade (BRASIL, 2021; Ferreira; Tinôco, 2022).

Este capítulo tem como objetivo analisar a dinâmica espacial e temporal das áreas úmidas localizadas no baixo curso do rio Pindaré, a partir de séries temporais de imagens de sensoriamento remoto. O uso integrado de dados de radar (Sentinel-1) possibilitará a elaboração de um mapeamento multitemporal das áreas inundadas, visando identificar padrões de variação interanual e sazonal entre 2017 e 2024. Os resultados obtidos serão fundamentais para compreender as respostas do ambiente hídrico às variações climáticas e subsidiar as análises subsequentes sobre eventos de cheias e secas extremas e seus impactos na dinâmica das áreas úmidas regionais.

Nesse contexto, emerge a necessidade urgente de criação e fortalecimento de áreas protegidas, com o objetivo de garantir a manutenção ecológica dos ecossistemas (Diegues, 2000; Margules & Pressey, 2000). Entre essas áreas, as zonas úmidas se destacam por constituírem ecossistemas essenciais para a manutenção dos ciclos hidrológico e

biogeoquímico, além de servirem como habitats para uma ampla diversidade de espécies de flora e fauna (MMA, 2021; Junk et al., 2014).

No Brasil, a perda desses ambientes tem sido impulsionada principalmente pela urbanização, pela expansão agropecuária e pelas mudanças climáticas (Tundisi & Matsumura-Tundisi, 2008; Silva et al., 2020). Ressalta-se que, em território nacional, os sítios Ramsar estão concentrados no Pantanal, na Amazônia de várzea e nos manguezais.

No Maranhão, existem três sítios de grande relevância ecológica: a Área de Proteção Ambiental das Reentrâncias Maranhenses, o Parque Estadual Marinho do Parcel de Manuel Luís e a Área de Proteção Ambiental da Baixada Maranhense. Nesse cenário, destaca-se o baixo curso do rio Pindaré, um dos principais cursos d'água da região, que atravessa áreas de elevada importância ecológica (IBGE, 2019).

Sendo assim, o presente estudo busca identificar e caracterizar as áreas úmidas ao longo do baixo curso do rio Pindaré, utilizando ferramentas de geotecnologia, como o sensoriamento remoto e os sistemas de informação geográfica (SIG), a fim de compreender suas dinâmicas e vulnerabilidades.

## **METODOLOGIA**

Este trabalho consta com a presença de três etapas metodológicas, sendo elas: identificação e mapeamento das áreas úmidas, aquisição de dados climáticos e a validação dos dados em campo.

Em primeiro momento, para o mapeamento das áreas úmidas no baixo curso do rio Pindaré, foram utilizadas imagens orbitais, através do sensor Sentinel-1A, disponibilizadas pela plataforma do USGS e adquiridas a partir da aplicação do script no google earth engine, com base na metodologia de BORGES, J. P. (2021); SILVA, D. B. (2020) e ALMEIDA, R. S., & SOUZA, A. F. (2022). Esta etapa metodológica consta com a escolha de cenas, aplicação de filtros para o período temporal, resolução espacial e a polarização de bandas. As imagens foram filtradas para o período entre março e setembro de 2017 a 2024<sup>3</sup>, e a coleção foi selecionada com base nas polarizações VV e VH, no modo IW (Interferometric Wide). Em seguida, para a identificação da máscara d'água, é utilizado o cálculo do Radar Vegetation Index Modificado (RVImod), um índice desenvolvido a partir do Radar Vegetation Index (RVI) original, proposto

---

<sup>3</sup> O Sentinel-1 do Copernicus foi lançado no de 2016, acompanhado do satélite Sentinel- 1B, denominado de satélite gêmeo, no qual disponibiliza imagens de radar desde o ano de 2017. Em decorrência disso, o período temporal abrangeu apenas a análise dos últimos 7 anos.

por Kim & van Zyl (2009) para estimativas de umidade do solo. O índice RVImod foi adaptado para a identificação de áreas com presença de água, dado que superfícies inundadas têm um comportamento característico de baixo retroespalhamento radar. A fórmula utilizada para o cálculo do índice foi a seguinte:

$$RVImod = \frac{4 \cdot VH}{(VV + VH)^2}$$

A fórmula RVImod processa uma imagem Sentinel-1 com base nas bandas VV e VH, adicionando uma nova banda à imagem. A partir disso, o cálculo identifica áreas com a presença de lâmina d'água. O processamento das imagens Sentinel-1 foi realizado em linguagem JavaScript no Google Earth Engine (GEE), com a aplicação de uma máscara de classificação para identificar as áreas de lâmina d'água. A máscara binária foi definida com base em limiares empíricos, considerando como áreas inundadas os pixels cujo índice RVImod se situava entre -0.07 e 0.00, com base em testes e adaptações observadas em pesquisas anteriores.

Para a segunda etapa, em relação aos dados climáticos, objetivou-se identificar a aquisição referentes às normais climatológicas da única estações meteorológicas correlata a área de estudo, sendo a estação convencional de Zé doca (única estação convencional disponível na região de estudo), essas informações foram disponibilizadas e coletadas no site do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) que dispõe de séries históricas, especificamente para o ano de 1990 a 2024. A fim de agregar os resultados obtidos pela estação convencional, foram utilizados dados das estações automáticas e pluviômetros.

Por fim, a fim de validar todas as informações, foi realizado um trabalho de campo no período de 12-03-2025, período conhecido pela sazonalidade dos campos cheios.

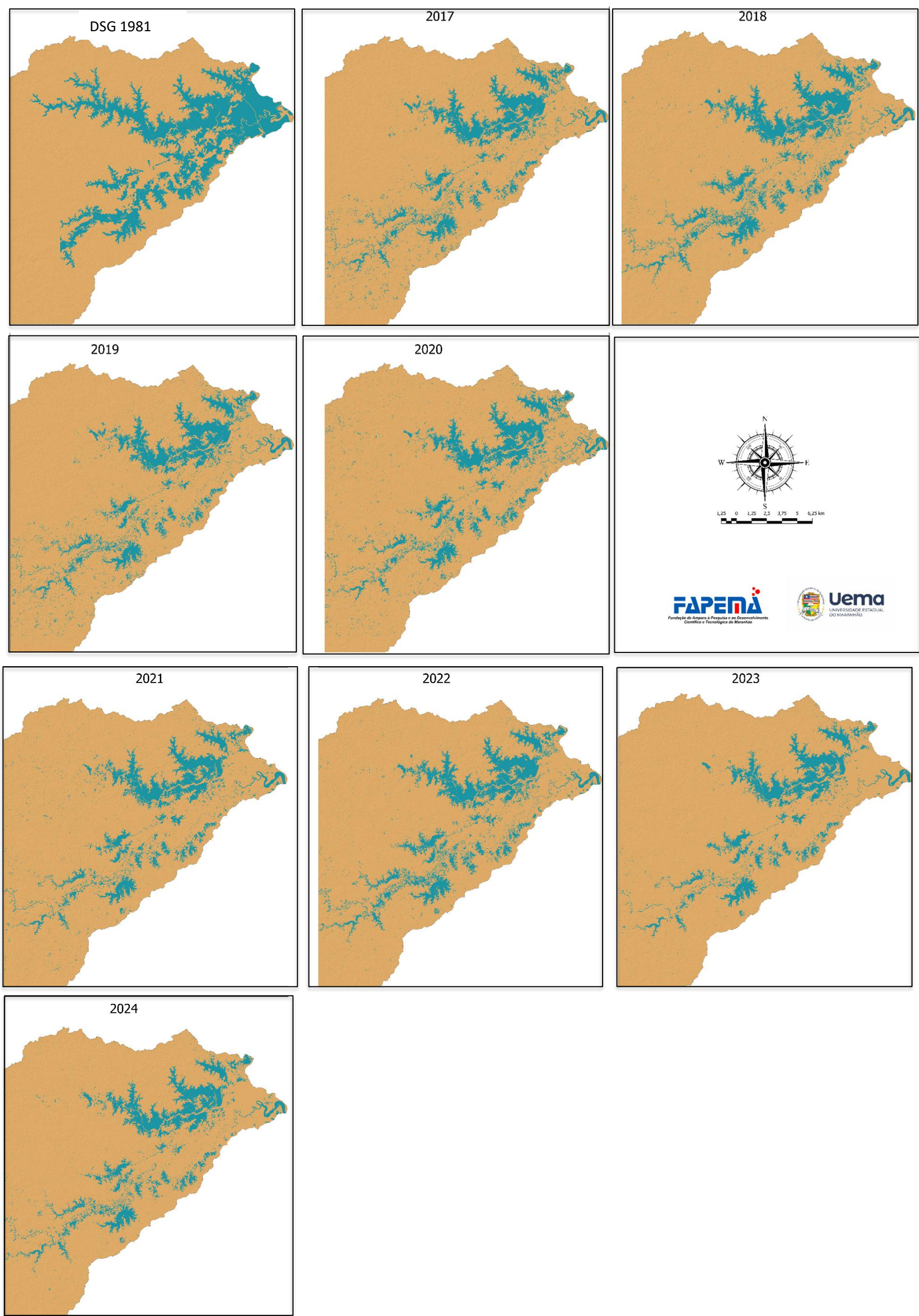
## RESULTADOS E DISCUSSÃO

As cheias em bacias hidrográficas tropicais constituem eventos naturais com papel fundamental na dinâmica ecológica das áreas úmidas, especialmente nas planícies de inundação (Neiff, 2001; Junk; Wantzen, 2004). No baixo curso do rio Pindaré, esses eventos determinam a sazonalidade das áreas alagadas e influenciam diretamente a conectividade hidrológica entre o rio, os lagos marginais e as planícies úmidas. A variabilidade do regime de chuvas é, por sua vez, um dos principais fatores que regulam a intensidade e a frequência dessas inundações (Marchese et al., 2015; ANA, 2023).



A análise dos dados mapeados entre 2017 e 2024 revelou oscilações significativas na extensão das áreas úmidas durante o período chuvoso, evidenciando sua elevada sensibilidade à variabilidade climática regional (figura 1). Entretanto, quando se observa o mapeamento de 1981 (DSG), constata-se que a configuração espacial das áreas úmidas naquele período apresentava maior continuidade e extensão em comparação com os anos recentes, funcionando como um marco histórico de referência para compreender as transformações ambientais ocorridas ao longo das últimas décadas. Vale destacar, que a carta DSG de 1981 leva em consideração a limnologia e os campos de alagamento.

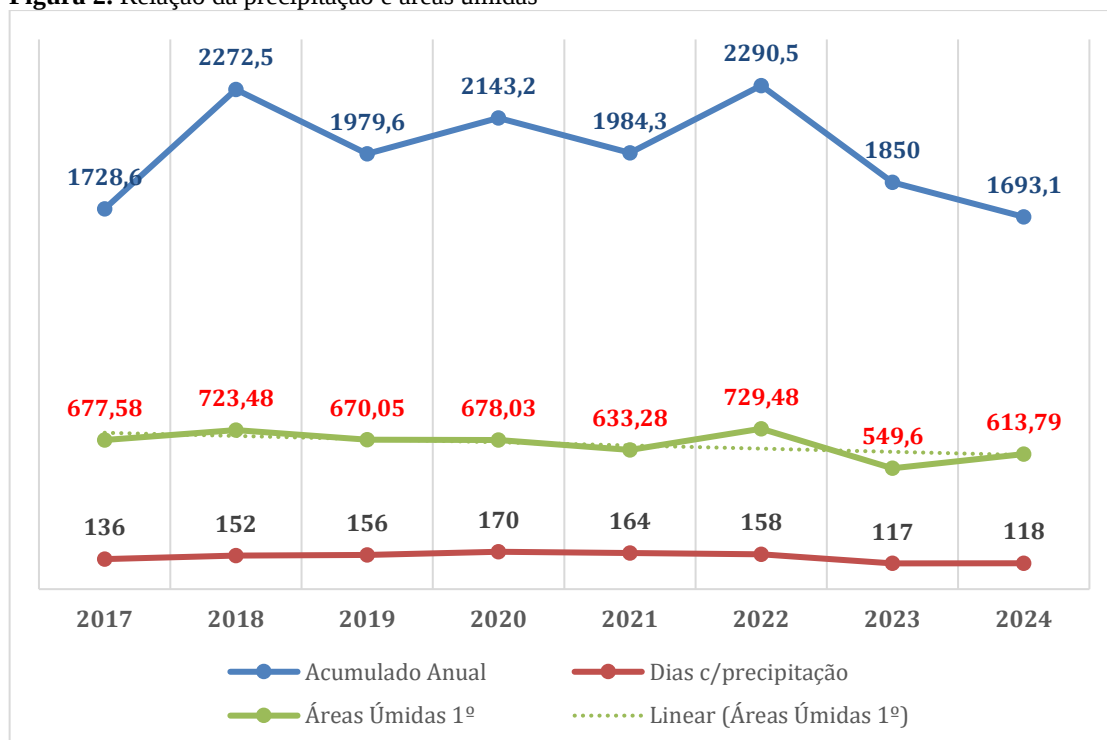
Figura 1. Mapeamento das Áreas Úmida



Elaboração: A Autora, 2025.

A análise pluviométrica demonstrou que os anos de 2017 e 2020 registraram os maiores volumes de precipitação no período analisado, com totais anuais acima da média histórica da região. Em 2018, a estação de Zé Doca, por exemplo, registrou um crescimento expressivo com aproximadamente 2.272 mm durante o ano (Figura 2), este volume embora seja elevado, apresentaram um volume de chuva abaixo que o esperado mediante da baixa atuação do La Niña e da ZCIT sobre o estado do Maranhão (INPE, 2018).

**Figura 2.** Relação da precipitação e áreas úmidas



**Elaboração:** A Autora, 2025.

Destaca-se que os anos de 2020 e, sobretudo, de 2022 apresentaram os maiores volumes anuais de precipitação do período analisado. Em 2022, o total pluviométrico atingiu 2.290,5 mm, conforme os dados consolidados da estação de Zé Doca. Esse comportamento excepcional refletiu-se também no número de dias com chuva: foram registrados 158 dias (Tabela 1), concentrados principalmente no primeiro semestre (119 dias), evidenciando uma distribuição marcadamente sazonal, típica de regiões tropicais influenciadas por sistemas atmosféricos de grande escala.



**Tabela 1.** Relação da precipitação e áreas úmidas

| Ano          | Acumulado Anual (mm) | Áreas Úmidas    | Dias c/ precipitação |
|--------------|----------------------|-----------------|----------------------|
| 2017         | 1.728,60             | 677,58          | 136                  |
| 2018         | 2.272,50             | 723,48          | 152                  |
| 2019         | 1.979,60             | 670,05          | 156                  |
| 2020         | 2.143,20             | 678,03          | 170                  |
| 2021         | 1.984,30             | 633,28          | 164                  |
| 2022         | 2.290,50             | 729,48          | 158                  |
| 2023         | 1.850,00             | 549,60          | 117                  |
| 2024         | 1.693,10             | 613,79          | 118                  |
| <b>Total</b> | <b>15.941,80</b>     | <b>3.875,76</b> | <b>1.171,00</b>      |

**Elaboração:** A autora, 2025.

A atuação dos sistemas atmosféricos de grande escala foi determinante para esse comportamento. Em 2022, a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) posicionou-se de forma persistente sobre o norte e nordeste do Brasil durante o trimestre fevereiro-março-abril, promovendo um corredor de umidade contínuo sobre o Maranhão. A previsão de anomalia de precipitação elaborada pelo INMET (2022) já indicava a tendência de chuvas acima da média para o norte e nordeste do país nesse período.

Além da ZCIT, a presença de Vórtices Ciclônicos em Altos Níveis (VCANs) sobre o Atlântico tropical contribuiu para a intensificação das chuvas convectivas, especialmente no início da estação (INPE, 2022). A atuação conjunta desses sistemas reforçou a convecção, favorecendo o desenvolvimento de núcleos de chuva persistentes e de alta intensidade, que alimentaram os rios da região e provocaram a elevação do nível das águas nas planícies alagáveis.

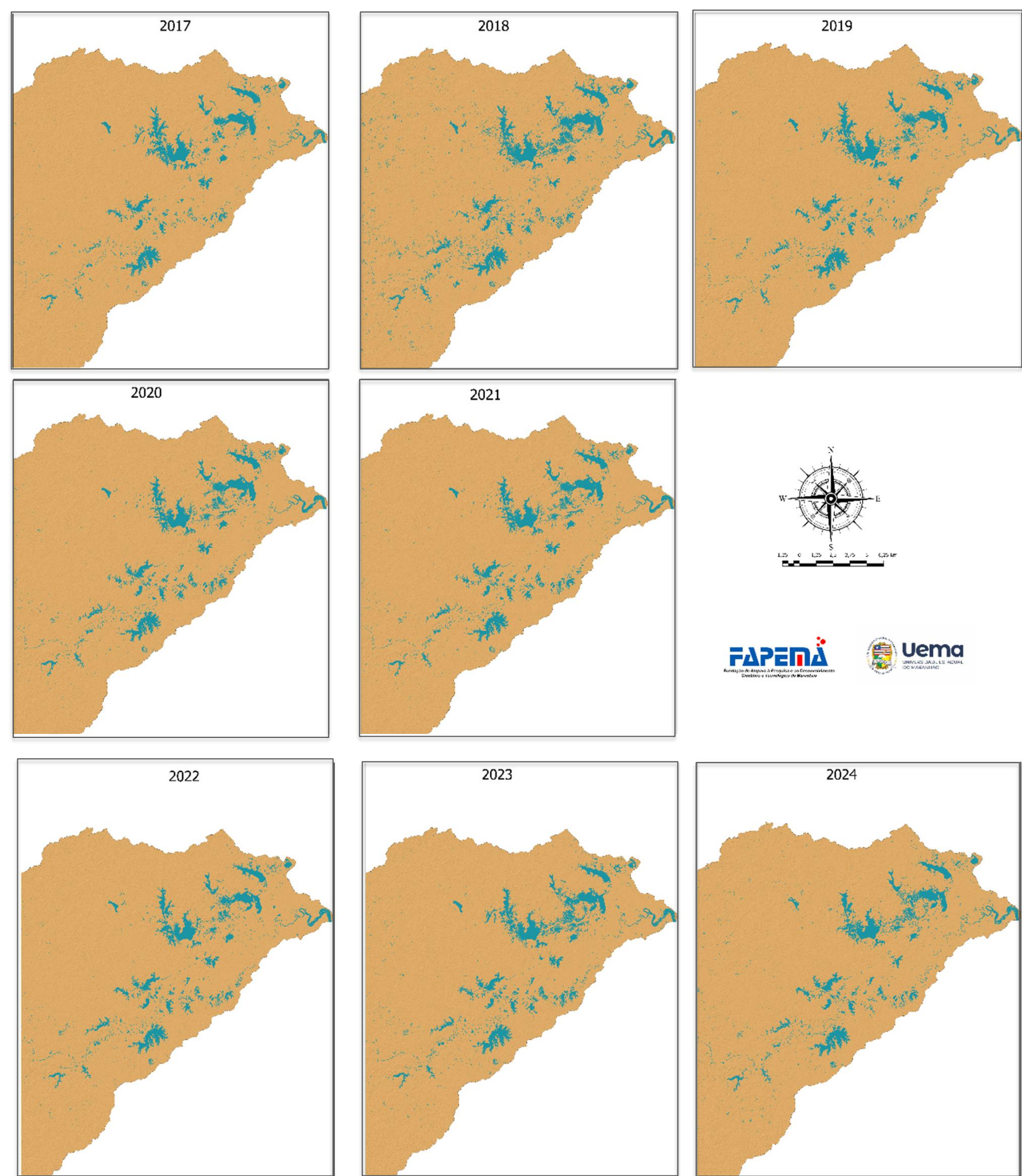
Assim, o ano de 2022 constitui um exemplo notável de como o aumento na frequência e intensidade das chuvas, associado à persistência de sistemas atmosféricos favoráveis, pode favorecer a expansão das áreas úmidas. Ressalta-se que a dinâmica desses ambientes é fortemente sazonal, com retração natural durante o período seco. Contudo, em situações de seca mais intensa ou prolongada, essas retrações tornam-se mais acentuadas, comprometendo a resiliência ecológica e os serviços ecossistêmicos associados.

A Figura 3 e 4 evidencia oscilações significativas na extensão das áreas úmidas ao final da estação seca. Em 2018, registrou-se o maior valor da série, explicado no capítulo anterior por condições atmosféricas favoráveis: 152 dias de precipitação e um acumulado de 2.272,5 mm, distribuídos em 111 dias no primeiro semestre e 41 no segundo (Tabela 2). Essa distribuição relativamente equilibrada resultou em 436,45 km<sup>2</sup> de áreas úmidas em setembro, indicando a permanência da água mesmo durante o período seco. Em contraste, 2017



apresentou a menor extensão da série, com apenas 319,46 km<sup>2</sup>. A média geral foi de aproximadamente 355 km<sup>2</sup>, sugerindo que, na maior parte dos anos, ocorre retração moderada das áreas úmidas.

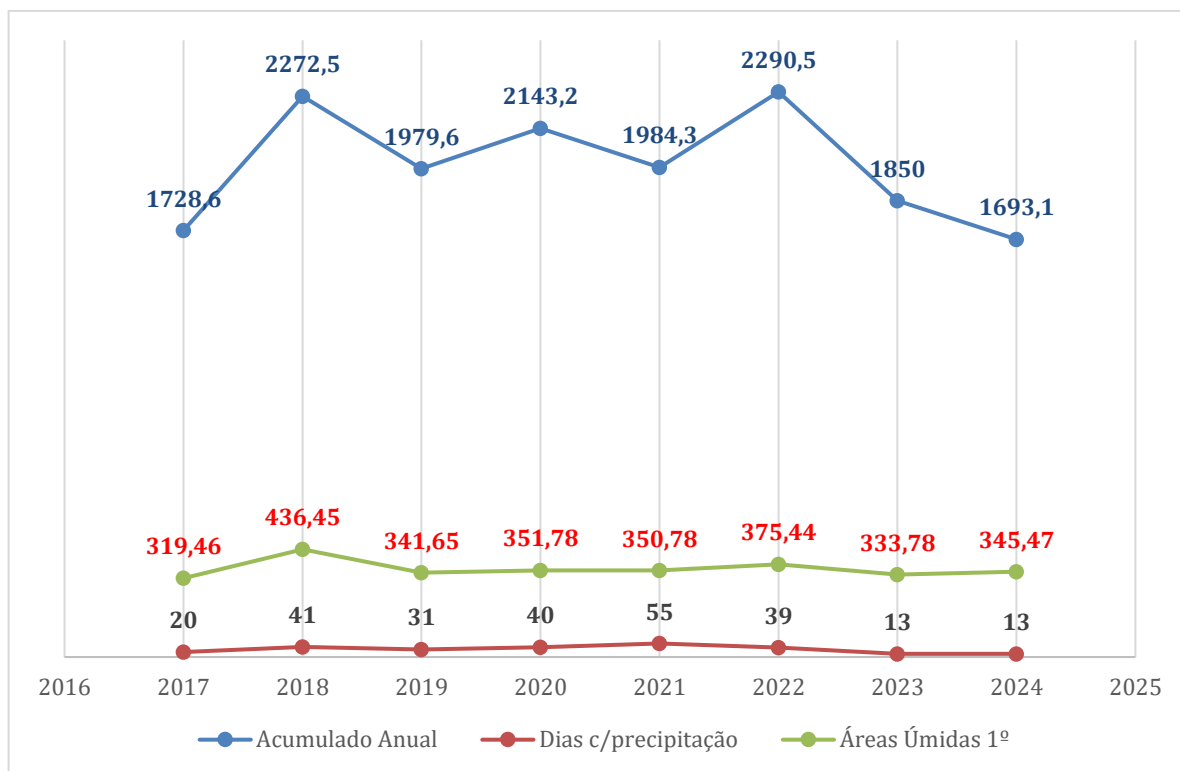
Figura 3. Mapeamento das áreas úmidas 2º semestre



Elaboração: A Autora, 2025.



**Figura 4.** Relação da precipitação e áreas úmidas 2º semestre



**Elaboração:** A Autora, 2025.

**Tabela 2.** Dias com precipitação no 1º e 2º semestre

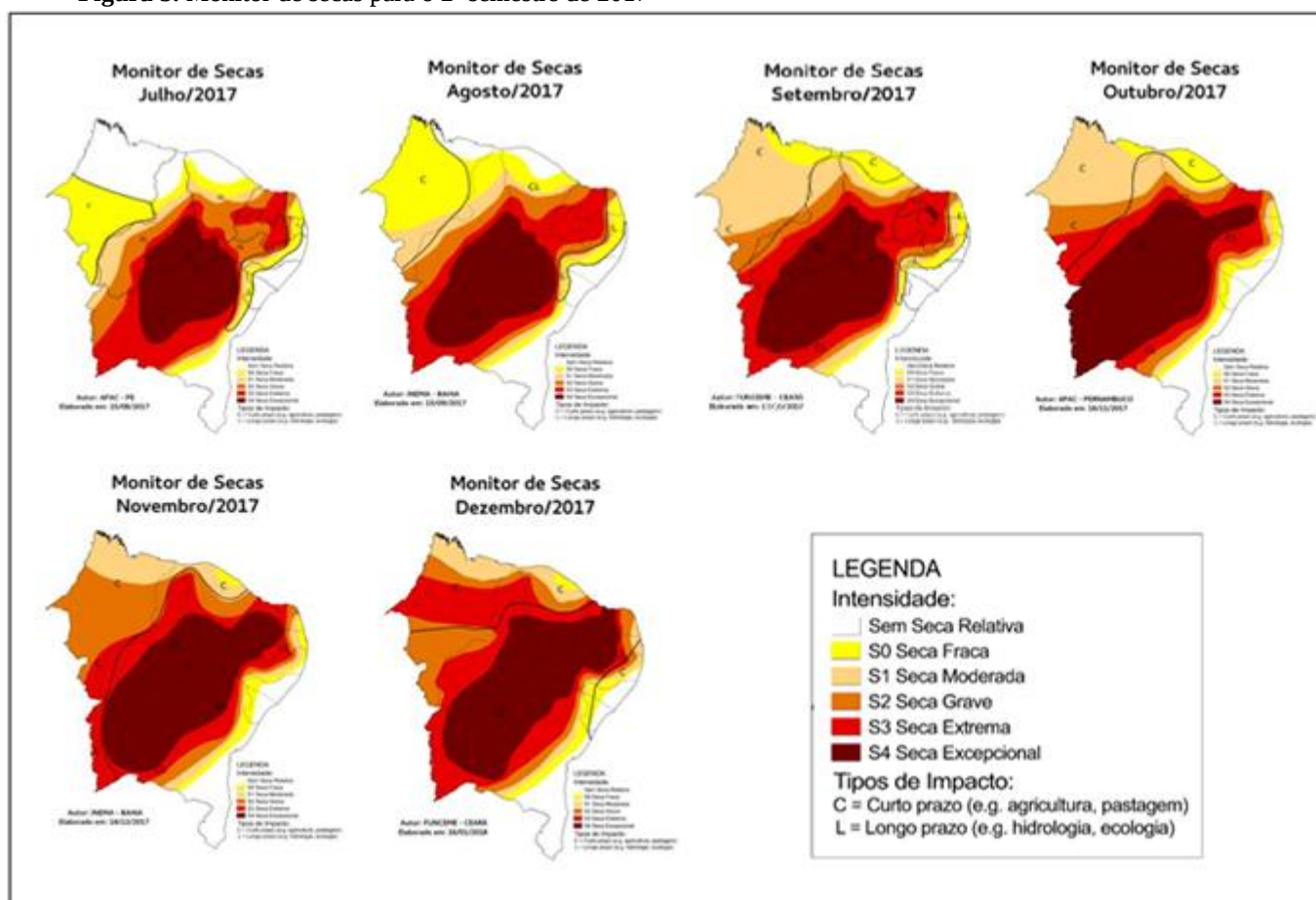
| Ano  | Dias c/ Precipitação | 1 Semestre | 2 Semestre |
|------|----------------------|------------|------------|
| 2017 | 136                  | 116        | 20         |
| 2018 | 152                  | 111        | 41         |
| 2019 | 156                  | 125        | 31         |
| 2020 | 170                  | 130        | 40         |
| 2021 | 164                  | 109        | 55         |
| 2022 | 158                  | 119        | 39         |
| 2023 | 117                  | 104        | 13         |
| 2024 | 118                  | 105        | 13         |

**Elaboração:** A Autora, 2025.

A variação interanual das áreas úmidas sugere que a dinâmica de seca não está relacionada apenas à ausência de chuvas no período seco, mas também à intensidade, regularidade e distribuição das chuvas no período úmido anterior, que determinam o volume de recarga de aquíferos rasos, lagos e solos saturados. Assim, mesmo que o segundo semestre apresente chuvas reduzidas, os efeitos do primeiro semestre ainda podem garantir a manutenção das áreas alagadas.

Dessa forma, conforme os boletins do CPTEC/INPE (2017; 2022) e dados do NUGEO/UEMA, o ano de 2017 foi marcado por irregularidades nas chuvas e fraca atuação da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), especialmente no primeiro semestre, com menor aporte hídrico. Isso gerou impactos negativos tanto no pico da estação chuvosa quanto no período seco subsequente, refletindo um ciclo hidrológico de baixa recarga. Esse padrão é reforçado pela análise dos dados do Monitor de Secas de 2017 (Figura 5), que evidenciam o agravamento das condições de seca a partir de julho. Entre julho e setembro, observa-se a transição de seca fraca a moderada, intensificando-se para seca grave em outubro e novembro, especialmente nas áreas centrais do Maranhão. Em dezembro, o padrão de seca ainda persistia com intensidade moderada a grave em grande parte da região, indicando que a escassez de água afetou não apenas as chuvas, mas também a umidade do solo e o armazenamento hídrico, o que contribuiu diretamente para a baixa extensão das áreas úmidas observada naquele ano.

**Figura 5.** Monitor de secas para o 2º semestre de 2017



**Fonte:** Monitor de secas, 2017.

Por outro lado, anos como 2020 e, especialmente, 2022 apresentaram áreas úmidas mais extensas mesmo durante o mês de setembro, resultado da ocorrência de chuvas mais

regulares e bem distribuídas no primeiro semestre, o que favoreceu a maior retenção hídrica nas planícies de inundação. Em 2020, foram registrados 170 dias com precipitação ao longo do ano, sendo 130 dias concentrados no primeiro semestre e 40 no segundo. Essa configuração resultou em uma área úmida de 351 km<sup>2</sup> no período seco. Situação semelhante ocorreu em 2022, que, apesar de apresentar um total de 158 dias com chuva, apresentou volume pluviométrico mais elevado, principalmente devido à atuação conjunta do fenômeno ENOS (El Niño–Oscilação Sul) e de uma Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) mais intensa e posicionada ao sul da média climatológica. Nesse ano, as chuvas estiveram concentradas em 119 dias no primeiro semestre e 39 no segundo, refletindo-se diretamente na extensão das áreas úmidas, que atingiram 375 km<sup>2</sup> em setembro. Esse comportamento reforça o papel do pulso de inundação como fator determinante na manutenção da água no ambiente, sobretudo em áreas de várzea e sistemas lacustres rasos (Junk *et al.*, 1989; Cunha *et al.*, 2005).

Em contraste, os anos de 2023 (1.850 mm) e 2024 (1.693,1 mm) registraram quedas nos índices de precipitação, com consequente redução das áreas úmidas para 333,78 km<sup>2</sup> em 2023 e 345,47 km<sup>2</sup> em 2024. Esses valores evidenciam uma resposta rápida do sistema lacustre ao déficit hídrico.

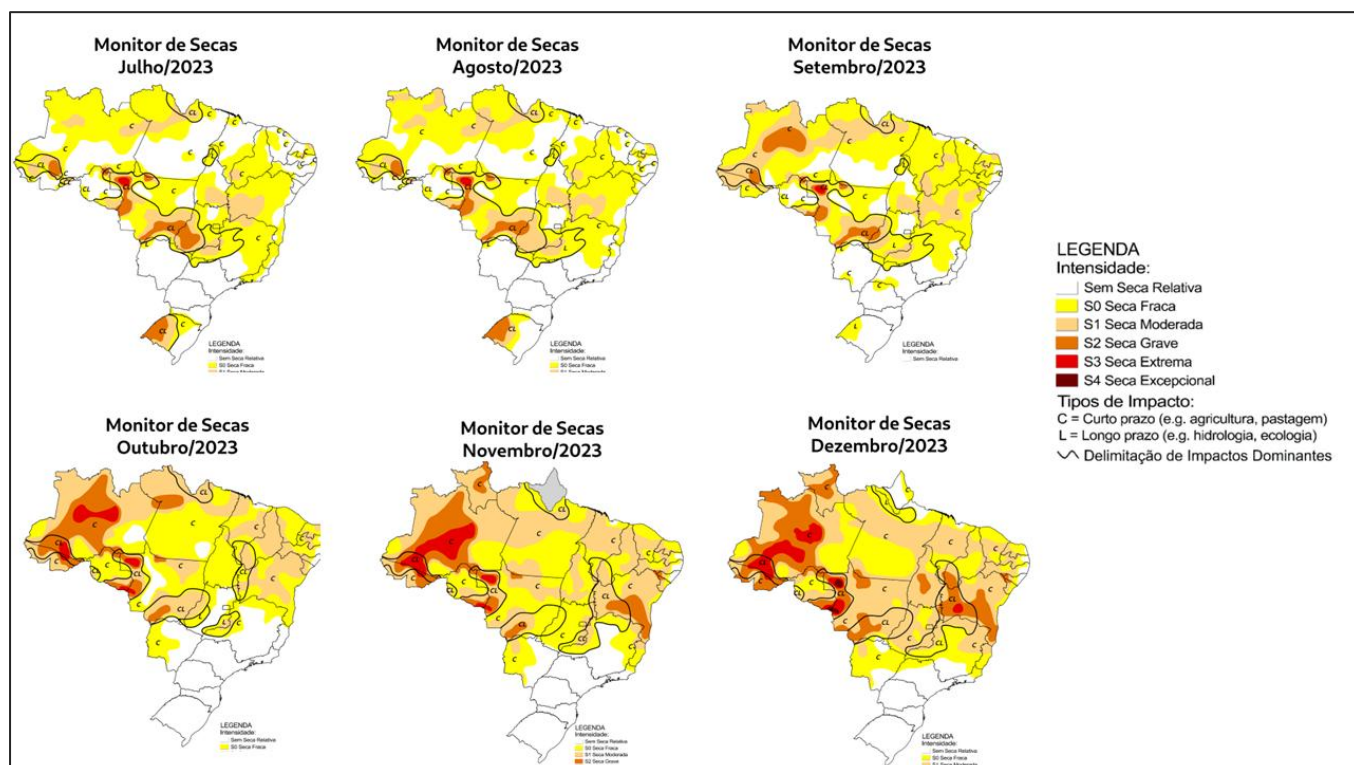
Em 2023, além da redução no volume de chuvas, o segundo semestre foi marcado pela presença do fenômeno El Niño, intensificando as anomalias climáticas. Segundo levantamento do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2023), nove dos doze meses de 2023 apresentaram médias de temperatura acima da média histórica (1991–2020), sendo setembro o mês com maior desvio desde 1961, com 1,6°C acima da média climatológica. Esses fatores, associados ao aquecimento global registrado pela Organização Meteorológica Mundial (OMM, 2023), que apontou 2023 como o ano mais quente já registrado no planeta, reforçam a influência direta das variabilidades climáticas sobre a dinâmica e a retração das áreas úmidas.

Para o último trimestre de 2023 (outubro, novembro e dezembro), segundo o INMET (2023), o estado do Maranhão apresentou anomalias positivas de temperatura média, com valores variando entre +1°C e +2°C acima da climatologia histórica (1981–2010). Essa elevação acentuada nas temperaturas está associada à atuação do fenômeno El Niño, que intensificou o aquecimento atmosférico em grande parte do país, especialmente na região Nordeste. No Maranhão, esse aumento térmico teve consequências diretas sobre os ecossistemas úmidos, ao favorecer a intensificação da evapotranspiração, reduzir a umidade do solo e comprometer a manutenção dos corpos d'água e áreas alagáveis durante a estação seca.

A análise dos dados do Monitor de Secas (Figura 6), que abrange os meses de julho a dezembro de 2023, confirma esse cenário crítico, revelando o agravamento progressivo da seca

em grande parte do território nacional, com destaque para as regiões Centro-Oeste, Norte e Nordeste. No Maranhão, observa-se o avanço de áreas classificadas com seca fraca (S0) e seca moderada (S1), além da presença de impactos de curto e longo prazo, que indicam prejuízos tanto para atividades agrícolas quanto para os sistemas hídricos e ecológicos. A presença dessas manchas de seca, especialmente nos últimos meses do ano, coincide com o período de maior retração das áreas úmidas mapeadas na região do Baixo Pindaré, evidenciando a correlação direta entre os fenômenos climáticos e a dinâmica hidrológica local.

**Figura 6.** Monitor de secas no 2º semestre de 2023



Fonte: Monitor de Secas, 2023.

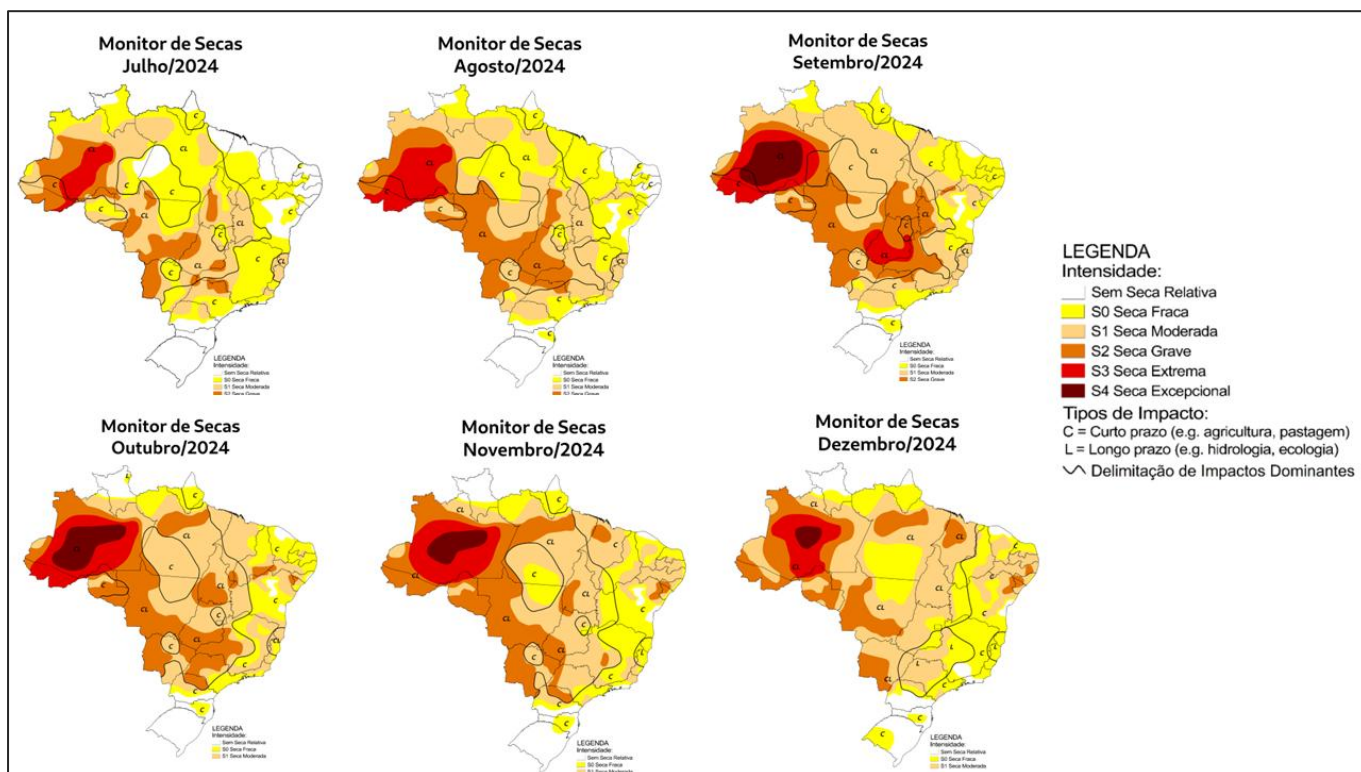
Na região de estudo, a influência do El Niño também resultou na drástica redução dos dias de precipitação no segundo semestre, com apenas 13 registros pluviométricos, conforme os dados da estação de Zé Doca. Essa combinação de chuvas escassas e temperaturas elevadas ocasionou uma retração significativa das áreas úmidas, cuja extensão ficou abaixo da média histórica, atingindo o menor valor observado na série temporal analisada. Tal cenário evidencia o alto grau de sensibilidade das zonas úmidas às variações climáticas, conforme demonstrado por Marengo et al. (2023), que apontam que os efeitos do El Niño, quando intensificados por tendências de aquecimento global, podem provocar impactos duradouros na hidrologia regional e na sustentabilidade dos ecossistemas aquáticos. A intensificação da seca, somada à

persistência de anomalias térmicas, revela a urgência de estratégias de monitoramento e mitigação voltadas à conservação desses ambientes vulneráveis.

A tendência de declínio na extensão das áreas úmidas manteve-se em 2024, ainda sob forte influência do fenômeno El Niño, reforçando ainda mais a correlação observada entre a precipitação acumulada e a dinâmica das zonas alagadas. A atuação do El Niño impactou significativamente o regime climático da região Nordeste e, em particular, a bacia hidrográfica do rio Pindaré, provocando a redução das chuvas e o aumento das temperaturas médias. De acordo com os dados da estação convencional de Zé Doca, foram registrados apenas 118 dias com precipitação no ano, distribuídos em 105 dias no primeiro semestre e apenas 13 dias no segundo semestre, revelando uma severa diminuição da regularidade e quantidade das chuvas, especialmente no período seco. Esse padrão limitou a recarga dos corpos d'água superficiais e contribuiu para o rebaixamento dos níveis freáticos, implicando em maior retração das áreas úmidas na região.

Essa situação foi agravada pelas condições de seca registradas no Maranhão ao longo do segundo semestre de 2024, conforme evidenciam os dados do Monitor de Secas (Figura 7). A partir de julho, observou-se a intensificação dos níveis de severidade, com registros de seca fraca (S0) e seca moderada (S1) em diversas regiões do estado, evoluindo para seca grave (S2) e até seca extrema (S3) nos meses de setembro a novembro, com impactos de curto (C) e longo prazo (L) sobre o meio físico e socioeconômico. Mesmo em dezembro, houve a persistência de áreas sob seca moderada a grave, o que indica um déficit hídrico acumulado que comprometeu não apenas as atividades produtivas, como também o equilíbrio hidrológico dos ecossistemas alagáveis. Tal cenário climático é coerente com o comportamento observado do El Niño, cujo ápice se deu de forma precoce entre novembro e dezembro de 2024, provocando precipitações abaixo da média e temperaturas elevadas, como demonstram os boletins do INPE (2024) e as anomalias térmicas apontadas pelo INMET (2024).

**Figura 7.** Monitor de secas no 2º semestre de 2024



Fonte: Monitor de Secas, 2023.

A combinação entre baixa precipitação e maior evaporação resultante das temperaturas elevadas impulsionou a retração expressiva das áreas alagadas, conforme evidenciado nos dados desta pesquisa. A correlação entre os volumes pluviométricos e a extensão das áreas úmidas no Maranhão converge com os resultados de Baptista et al. (2021), que, ao analisarem a resposta das áreas úmidas da Amazônia Oriental às variações do regime hídrico, constataram que tais sistemas apresentam forte sensibilidade às reduções na precipitação acumulada.

A tendência de declínio observada ao longo da série — com queda de aproximadamente 24% entre 2017 (723,48 km<sup>2</sup>) e 2023 (549,6 km<sup>2</sup>) — pode estar associada a fatores como a irregularidade na distribuição das chuvas, alterações nos padrões atmosféricos globais e regionais, e pressões antrópicas sobre a paisagem.

Essa variação está de acordo com estudos realizados por Padovani et al. (2005), que destacam a estreita relação entre o regime pluviométrico e a extensão das áreas úmidas no Brasil, especialmente em regiões tropicais onde as chuvas atuam como principal motor da dinâmica hidrológica superficial. Segundo os autores, em anos de anomalias negativas de precipitação, observa-se não apenas a redução das áreas alagadas, mas também impactos diretos na biodiversidade, nos serviços ecossistêmicos e na recarga hídrica local.

O comportamento oscilante das áreas úmidas mapeadas também reforça o que foi apontado por Junk et al. (2006) e Nunes da Cunha et al. (2012) em seus estudos sobre várzeas e planícies inundáveis: a dinâmica dessas áreas é controlada principalmente pelo pulso de inundação, que define não apenas a área alagada, mas também processos ecológicos como germinação, reprodução, migração de espécies e produção primária. Assim, a menor extensão de áreas úmidas em anos como 2022 e 2023 indica a ausência ou enfraquecimento desse pulso, com consequências diretas para os processos ecológicos locais.

Além do controle climático, mudanças no uso e cobertura da terra podem contribuir para a modificação da dinâmica de áreas úmidas. O avanço de pastagens, agricultura mecanizada e ocupação urbana nas bordas das planícies de inundação pode dificultar a conectividade hidrológica, reduzindo a capacidade de armazenamento e infiltração de água (Cunha; Junk; Wantzen, 2005). Tais processos ainda carecem de mapeamento específico na região do Pindaré, mas sua ocorrência tem sido registrada em outros setores da Baixada Maranhense e nas bacias vizinhas (IBGE, 2012; MMA, 2002).

Outro fator condicionante para a redução das áreas úmidas nos últimos anos pode estar associado à atuação de eventos climáticos como o El Niño, que altera o posicionamento da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), principal sistema responsável pela formação de chuvas no norte e nordeste do Brasil. Conforme os boletins do CPTEC/INPE (2023) e do NUGEO/UEMA (2024), a atuação do El Niño em 2023 e início de 2024 gerou déficits pluviométricos significativos no estado do Maranhão, afetando diretamente os volumes acumulados nas estações de Zé Doca, Bacabal e Santa Inês.

## **CONSIDERAÇÕES FINAIS**

O mapeamento multitemporal das áreas úmidas no baixo curso do rio Pindaré evidenciou a elevada sensibilidade desses ecossistemas às variações climáticas e aos eventos hidrológicos extremos. A análise entre 2017 e 2024 demonstrou que a extensão das zonas alagadas está diretamente associada ao regime pluviométrico, em especial à intensidade e à distribuição das chuvas no primeiro semestre, que garantem a recarga hídrica necessária para a manutenção das planícies inundáveis durante o período seco.

Observou-se que anos marcados por maior regularidade de chuvas, como 2018, 2020 e 2022, favoreceram a expansão e a persistência das áreas úmidas, enquanto anos de déficit hídrico, como 2017, 2023 e 2024, revelaram retrações significativas, acentuadas pela atuação de fenômenos atmosféricos globais, como o El Niño. Esses resultados reforçam o papel central do pulso de inundação como regulador da dinâmica ecológica e hidrológica local.

Além do controle climático, pressões antrópicas decorrentes do uso e cobertura da terra representam um desafio adicional para a conservação desses ambientes, afetando sua conectividade e capacidade de resiliência. Assim, os achados desta pesquisa corroboram a necessidade de fortalecer políticas públicas voltadas à proteção das áreas úmidas, integrando monitoramento contínuo por sensoriamento remoto, estratégias de mitigação dos impactos climáticos e práticas de gestão territorial sustentável.

Conclui-se que a conservação das áreas úmidas do baixo curso do rio Pindaré não se limita a uma questão ambiental, mas constitui elemento estratégico para a manutenção dos serviços ecossistêmicos, da biodiversidade e da qualidade de vida das populações locais, inserindo-se, portanto, no centro das discussões sobre desenvolvimento sustentável na Amazônia Oriental.

**Palavras-chave:** Sítio Ramsar, Radar, Clima, Rio Pindaré.

## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, R. S.; SOUZA, A. F. Utilização de imagens SAR do Sentinel-1 para o mapeamento de lâmina d'água em áreas inundáveis: uma aplicação no estado do Maranhão. *Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo, v. 52, n. 1, p. 45-58, jan./mar. 2022.
- ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. *Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2023: informe anual*. Brasília: ANA, 2023.
- BAPTISTA, G. M. M. et al. Resposta das áreas úmidas da Amazônia Oriental às variações do regime hídrico. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 14, n. 4, p. 1501–1517, 2021.
- BARBIER, Edward B. The concept of sustainable economic development. *Environmental Conservation*, v. 14, n. 2, p. 101-110, 1987.
- BARROS, A.; SILVA, J.; SOUSA, M. *Uso e cobertura da terra na região do baixo curso do rio Pindaré: implicações socioambientais*. *Revista Geográfica Maranhense*, v. 8, n. 2, p. 45–63, 2021.
- BORGES, J. P. Análise temporal de inundações no estado do Maranhão utilizando imagens do Sentinel-1 e técnicas de classificação. 2021. 275 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2021.
- BRASIL. *Relatório de Qualidade Ambiental 2021*. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2021.
- CARSON, Rachel. *Silent Spring*. Boston: Houghton Mifflin, 1962.
- COSTANZA, Robert et al. *Changes in the global value of ecosystem services*. *Global Environmental Change*, v. 26, p. 152–158, 2014.
- CPTEC/INPE – Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos. *Boletim de monitoramento climático 2017*. Cachoeira Paulista: CPTEC/INPE, 2017.

CPTEC/INPE – Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos. *Boletim de monitoramento climático 2023*. Cachoeira Paulista: CPTEC/INPE, 2023.

CUNHA, C. N.; JUNK, W. J.; WANTZEN, K. M. The role of vegetation in structuring the aquatic environment of Brazilian wetlands. In: JUNK, W. J.; CUNHA, C. N.; WANTZEN, K. M. (orgs.). *The Pantanal: ecology, biodiversity and sustainable management of a large neotropical seasonal wetland*. Sofia: Pensoft, 2005. p. 155–176.

CUNHA, Sandra Braga da. *Geografia ambiental: uma abordagem da relação sociedade-natureza*. 2. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2005.

DIEGUES, Antonio Carlos. *O mito moderno da natureza intocada*. 4. ed. São Paulo: Hucitec, 2000.

DSG – Diretoria de Serviço Geográfico. *Carta do Brasil: áreas úmidas*. Brasília: Exército Brasileiro, 1981.

FERREIRA, D.; TINÔCO, A. *Mudanças climáticas e vulnerabilidade socioambiental no Maranhão*. Revista Brasileira de Geografia Física, v. 15, n. 4, p. 1221–1238, 2022.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Base de informações ambientais: Maranhão*. Rio de Janeiro: IBGE, 2019.

\_\_\_\_\_. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Manual técnico da vegetação brasileira*. 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2012.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. *Anuário climático 2022*. Brasília: INMET, 2022.

\_\_\_\_\_. Instituto Nacional de Meteorologia. *Boletins meteorológicos 2024*. Brasília:

\_\_\_\_\_. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. *Boletim climático: análise da atuação do La Niña e da ZCIT sobre o Maranhão em 2018*. Cachoeira Paulista: INPE, 2018.

\_\_\_\_\_. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. *Boletim climático 2022: anomalias de precipitação no Brasil*. Cachoeira Paulista: INPE, 2022.

\_\_\_\_\_. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. *Boletim climático 2024*. Cachoeira Paulista: INPE, 2024.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.

JUNK, W. J. et al. A classification of major naturally-occurring Amazonian wetlands. *Wetlands*, v. 26, n. 1, p. 11–27, 2006.

JUNK, W. J.; WANTZEN, K. M. Flood pulsing and the dynamics of river–floodplain systems. In: WELCOMME, R.; PETR, T. (orgs.). *Proceedings of the Second International Symposium on the Management of Large Rivers for Fisheries*. Bangkok: FAO, 2004. p. 261–280.

JUNK, Wolfgang J.; PIEDADE, M. T. F.; SCHÖNGART, J. *Várzeas amazônicas: ecologia, conservação e desenvolvimento sustentável*. Manaus: INPA, 2015.

LEFF, Enrique. *Saber ambiental: sustentabilidade, racionalidade, complexidade, poder*. Petrópolis: Vozes, 2001.

MARCHESI, A.; BASTIANI, M.; RICCARDO, S. Hydrological variability and ecological dynamics in tropical floodplains. *Journal of Hydrology*, v. 527, p. 181–192, 2015.

MARENGO, J. A. et al. Extreme droughts and floods in a changing climate: impacts and risk management in Brazil. *Climatic Change*, v. 176, n. 3, p. 215–233, 2023.

MARGULES, Christopher R.; PRESSEY, Robert L. *Systematic conservation planning*. Nature, v. 405, p. 243–253, 2000.

MEA – Millennium Ecosystem Assessment. *Ecosystems and human well-being: synthesis*. Washington, D.C.: Island Press, 2005.

\_\_\_\_\_. Ministério do Meio Ambiente. *Áreas úmidas e seu papel na conservação da biodiversidade*. Brasília: MMA, 2021.

\_\_\_\_\_. Ministério do Meio Ambiente. *Áreas úmidas no Brasil: diagnóstico e perspectivas de conservação*. Brasília: MMA, 2002.

\_\_\_\_\_. Ministério do Meio Ambiente. *Relatório Nacional de Áreas Úmidas*. Brasília: MMA, 2022.

NEIFF, J. J. Diversity in some tropical wetland systems of South America. In: GOPAL, B.; JUNK, W. J.; DAVIS, J. A. (orgs.). *Biodiversity in wetlands: assessment, function and conservation*. Leiden: Backhuys, 2001. p. 157–186.

NOVO, Evelyn M. Leão de Moraes; ARAÚJO, Enilson; BARROS, Mariluz Leite. Mapeamento de áreas úmidas e sua importância para a gestão ambiental. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 58, n. 1, p. 53-63, 2006.

NUGEO/UEMA – Núcleo Geoambiental da Universidade Estadual do Maranhão. *Relatório de monitoramento climático do Maranhão 2024*. São Luís: UEMA, 2024.

NUNES DA CUNHA, C.; JUNK, W. J.; SILVA, C. J. The Pantanal: ecology, biodiversity and sustainable management of a large neotropical seasonal wetland. *Ecological Engineering*, v. 47, p. 1–3, 2012.

PADOVANI, C. R. et al. The relationship between rainfall and wetland dynamics in Brazil. *Wetlands Ecology and Management*, v. 13, p. 163–173, 2005.

RAMSAR. Convenção sobre Zonas Úmidas de Importância Internacional especialmente como Habitat de Aves Aquáticas. Ramsar, Irã, 1971.

ROCKSTRÖM, Johan et al. *A safe operating space for humanity*. Nature, v. 461, p. 472–475, 2009.

SACHS, Ignacy. *Caminhos para o desenvolvimento sustentável*. Rio de Janeiro: Garamond, 2008.

SILVA, D. B. Mapeamento de áreas alagadas no Brasil utilizando imagens Sentinel-1 e técnicas de processamento em Google Earth Engine. 2020. 155 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2020.

SILVA, Taynara Almeida da; VIEIRA, Livia Mendes; MENDES, Rafael Souza. *Análise das mudanças no uso e cobertura da terra em áreas úmidas brasileiras*. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 13, n. 6, p. 2452–2465, 2020.

TUNDISI, José Galizia; MATSUMURA-TUNDISI, Takako. *Limnologia*. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.

UNEP – United Nations Environment Programme. *Global Environment Outlook – GEO-6: Healthy planet, healthy people*. Cambridge: Cambridge University Press, 2019.