

# ANÁLISE DA DINÂMICA ESPAÇO-TEMPORAL DOS ESPELHOS D'ÁGUA DE LAGOAS COSTEIRAS DO PIAUÍ POR SENSORIAMENTO REMOTO

## ANALYSIS OF THE SPATIAL-TEMPORAL DYNAMICS OF WATER MIRRORS OF COASTAL LAGOONS IN PIAUÍ BY REMOTE SENSING

## ANÁLISIS DE LA DINÁMICA ESPACIO-TEMPORAL DE LOS ESPEJOS DE AGUA DE LAS LAGUNAS COSTERAS DE PIAUÍ MEDIANTE TELEDETECCIÓN

**Giovanna Santos de Souza**

Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente (PRODEMA)  
Universidade Federal do Piauí (UFPI)  
gih.ssouza@gmail.com

**Vicente de Paula Sousa Junior**

Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável de Goiás  
Fundação Getúlio Vargas - Agro  
vicentepsj@ufpi.edu.br

**Maria Helena Alves**

Universidade Federal do Piauí (UFPI)  
malves@ufpi.edu.br

**Ruceline Paiva Melo Lins**

Universidade Federal do Delta do Parnaíba (UFDPAr)  
rucelinelins@ufdpar.edu.br

**Ivanilza Moreira de Andrade**

Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente (PRODEMA)  
Universidade Federal do Delta do Parnaíba (UFDPAr)  
ivanilzamoreiraandrade@gmail.com

### RESUMO

Os ambientes aquáticos costeiros apresentam dinâmicas que estão sujeitas às interferências decorrentes de fenômenos climáticos e ações antrópicas, passíveis de impactar na variação de espelhos e cursos d'água, bem como na qualidade hídrica desses ecossistemas. Nesse contexto, objetivou-se com o presente estudo analisar, por meio de Sensoriamento Remoto, a dinâmica sazonal dos espelhos d'água de lagoas costeiras localizadas na região norte do estado do Piauí, como subsídio para a gestão e conservação desses ambientes. Foram selecionadas três lagoas, situadas em municípios litorâneos do estado do Piauí, para a aplicação do *Normalized Difference Water Index* (NDWI), visando comparar a variação da área superficial da água das lagoas no período chuvoso e seco, no período de 2013 a 2023. Observou-se que a influência do fenômeno *El Niño* e a redução dos índices de precipitação pluviométrica da região, somados ao barramento de rios tributários das lagoas, ocasionaram a perda de até 43% de área nas lagoas. Após o período de menor pluviosidade, entre 2013 a 2017, houve a recuperação de área das lagoas do Portinho e Sobradinho, com ganhos superiores ao estágio inicial em 2013, enquanto na lagoa da Santana ocorreu diminuição de área. Conclui-se que a variação de área das lagoas esteve relacionada, principalmente, aos eventos climáticos extremos e às ações antrópicas na região. O uso do Sensoriamento Remoto mostrou-se eficiente para compreensão e monitoramento da dinâmica sazonal, gerando dados necessários à gestão para conservação desses ambientes.

**PALAVRAS-CHAVE:** sazonalidade; eventos climáticos; NDWI.

### ABSTRACT

Coastal aquatic environments have dynamics that are subject to interference from climatic phenomena and human activity, which can impact the variation of water mirrors and watercourses, as well as the water quality of these

ecosystems. In this context, this study aimed to use Remote Sensing to analyze the seasonal dynamics of the water mirrors of coastal lagoons located in the northern region of the state of Piauí, as a tool for the management and conservation of these environments. Three lagoons, located in coastal municipalities in the state of Piauí, were selected for the application of the Normalized Difference Water Index (NDWI) to compare the variation in the surface area of the water in the lagoons during the rainy and dry periods, from 2013 to 2023. It was observed that the influence of the *El Niño* phenomenon and the reduction in rainfall in the region, combined with the damming of tributary rivers to the lagoons, led to the loss of up to 43% of their area. After the period of lower rainfall, from 2013 to 2017, the area of the Portinho and Sobradinho lagoons recovered, with gains higher than the initial stage in 2013, while the Santana lagoon lost area. It can be concluded that the variation in the area of the lagoons was mainly related to extreme climatic events and anthropogenic actions in the region. The use of remote sensing proved to be efficient in understanding and monitoring the seasonal dynamics, generating necessary data for the conservation management of these environments.

**KEYWORDS:** seasonality; climate events; NDWI.

## RESUMEN

Los ambientes acuáticos costeros presentan dinámicas sujetas a la interferencia de fenómenos climáticos y de la actividad humana, que pueden impactar en la variación de los espejos de agua y de los cursos de agua, así como en la calidad del agua de estos ecosistemas. En este contexto, este estudio tuvo como objetivo utilizar la Teledetección para analizar la dinámica estacional de los espejos de agua de lagunas costeras localizadas en la región norte del estado de Piauí, como herramienta para la gestión y conservación de estos ambientes. Tres lagunas, localizadas en municipios costeros del estado de Piauí, fueron seleccionadas para la aplicación del *Normalized Difference Water Index* (NDWI) para comparar la variación de la superficie del agua de las lagunas durante los períodos lluvioso y seco, de 2013 a 2023. Se observó que la influencia del fenómeno de El Niño y la reducción de las precipitaciones en la región, combinados con el represamiento de los ríos tributarios a las lagunas, provocaron la pérdida de hasta el 43% de su superficie. Después del período de menores precipitaciones, de 2013 a 2017, el área de las lagunas de Portinho y Sobradinho se recuperó, con ganancias superiores a la etapa inicial de 2013, mientras que la laguna de Santana perdió área. Se puede concluir que la variación en el área de las lagunas estuvo relacionada principalmente con eventos climáticos extremos y acciones antropogénicas en la región. El uso de la Teledetección demostró ser eficiente en la comprensión y el seguimiento de la dinámica estacional, generando datos necesarios para la conservación de las lagunas.

**PALABRAS CLAVE:** estacionalidad; eventos climáticos; NDWI.

## 1. INTRODUÇÃO

Sazonalmente a dinâmica hídrica de uma região é influenciada por comportamentos climáticos em um determinado período de tempo e que, sob a influência de fenômenos e anomalias atmosféricas, pode sofrer interferências na intensidade dos períodos de chuva (Nascimento *et al.*, 2019). A região Nordeste tem suas condições climáticas regidas por fatores de circulação atmosférica convencionais, como a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e Anticiclone do Atlântico, associados aos ventos alísios e incrementados pelas anomalias na condição média histórica da Temperatura da Superfície do Mar (TSM), como o *El Niño* (aquecimento) e *La Niña* (esfriamento) (Ferreira; Kemeses, 2023).

Considerando a dinâmica de ambientes aquáticos, as interferências desses fenômenos em um contexto de mudanças climáticas têm impactado as características pluviométricas da região, a variação de espelhos e cursos d'água e a dinâmica de comunidades aquáticas diversas, inclusive em lagoas costeiras (Mesquita; Lima; Santos Filho, 2018b; Woolway; Sharma; Smol, 2022).

Além disso, as lagoas costeiras com seus bens e serviços ecossistêmicos de alto valor monetário e não monetário, sustentam e são impactadas pelas diversas atividades sociais, culturais e econômicas ligadas ao turismo, a pesca, aquicultura, mineração, biotecnologia, recreação, energias renováveis, navegação e segurança alimentar (Ribeiro, E. *et al.*, 2020).

No Piauí, apesar dos esforços relacionados às políticas públicas implementadas em áreas de conservação (Vasistha; Ganguly, 2020), como a Área de Proteção Ambiental (APA) do Delta do rio Parnaíba e a Área de Relevante Interesse Ecológico (ARIE) da Lagoa do Portinho, a sensibilidade às alterações no ambiente das lagoas costeiras existe e exige o conhecimento e monitoramento de suas áreas, o que pode ser feito por meio de sensoriamento remoto, a partir de imagens de satélite.

A aplicação de técnicas de sensoriamento remoto, a partir de dados e imagens geoespaciais sem custos, pode minimizar limitações espaço-temporais apresentadas por métodos tradicionais de monitoramento, bem como impulsionar estudos para o conhecimento de características de corpos hídricos, possibilitando o levantamento e acompanhamento de informações em diferentes escalas espaciais e temporais, inclusive por longos períodos de anos (Pizani *et al.*, 2022).

Buscando compreender como a sazonalidade, os fenômenos climáticos e as ações antrópicas interferiram na variação de área das lagoas do Portinho, Sobradinho e Santana, objetivou-se com este estudo analisar, por meio de Sensoriamento Remoto, a dinâmica de 2013 a 2023 dos espelhos d'água de lagoas costeiras localizadas na região norte do estado do Piauí/Brasil, visando ampliar os conhecimentos, considerados ainda escassos, sobre esses ecossistemas aquáticos, e assim contribuir para gestão e conservação dos mesmos.

## 2. REVISÃO TEÓRICA

Espelho d'água refere-se à área ocupada por um corpo d'água, seja lago, lagoa, reservatório de barragem ou açude, que corresponde, no contexto da gestão dos recursos hídricos, à superfície contínua de água de um corpo hídrico exposta à atmosfera (ANA, 2013).

As lagoas costeiras são corpos de água permanentes ou temporários, com tamanho e salinidade em diferentes níveis e isoladas do mar, enquanto as lagunas são influenciadas pelo fluxo e refluxo das marés e ambas recebem, no Brasil, a mesma denominação de lagoa, independentemente de sua origem ou localização (Esteves, 2011; Souza; Moreira, 2017). Encontradas nas planícies costeiras, as lagoas e lagunas de origem natural possuem características que geram bens e serviços ambientais, culturais e econômicos (Ribeiro, E. *et al.*, 2020).

As lagoas e áreas adjacentes formam corredores ecológicos, que são refúgio e habitat para a biodiversidade, proporcionam a ciclagem de nutrientes, dão suporte à produção de alimento pela pesca, aquicultura e agropecuária. Além disso, dão condições de navegabilidade e regulação hídrica (Ribeiro, J. *et al.*, 2020), que são imprescindíveis à sobrevivência humana e contribuem para que sejam alcançados os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), principalmente os ODS 1: sem pobreza, 2: fome zero, 3: boa saúde e bem-estar, 6: água limpa e saneamento e 14: vida abaixo da água (Ribeiro, E. *et al.*, 2020).

Nesse sentido, as lagoas são ambientes mais susceptíveis aos impactos da sazonalidade e urbanização, pois suas águas têm uma permanência longa, quando comparadas aos rios, e uma dinâmica sensível às mudanças provenientes dos processos bióticos e abióticos internos e externos (Vasistha; Ganguly, 2020). A retirada e/ou deslocamento da água para aquicultura e irrigação, o desmatamento, que acelera o avanço de deslocamento de dunas, e erosão são interferências que podem acarretar a redução de volume d'água em lagoas costeiras, aumentando seu grau de trofia e alterando sua dinâmica ecossistêmica (Mesquita; Lima; Santos Filho, 2018b).

No momento em que a evaporação e a percolação de água superficial são maiores que os influxos de fontes de água a montante ou subterrâneas, as lagoas se tornam vulneráveis a eventos de inundações, que carregam contaminantes, macropoluentes e microrganismos quando a água é lixiviada de áreas com produções agrícolas e transbordamentos de esgotos, e/ou secas extremas, que reduzem o volume e área desses ambientes. Com isso, o processo de salinização é acelerado, podendo levar à seca completa do recurso hídrico (Weyhenmeyer *et al.*, 2024).

A resposta rápida das lagoas às mudanças ambientais, sejam elas naturais ou induzidas pela espécie humana (incluindo as mudanças climáticas), demonstram a sensibilidade de suas características físicas, químicas e biológicas aos efeitos de interferências dentro e fora do ecossistema (Adrian *et al.*, 2009).

Os fenômenos que ocorrem no oceano Pacífico Equatorial e na atmosfera adjacente, formando o *El Niño* Oscilação Sul (ENOS), causam alterações nos padrões de circulação atmosférica, transporte de umidade, temperatura e precipitação, que intensificadas por ações antrópicas, como a emissão de CO<sub>2</sub>, provocam mudanças climáticas em escala global (INPE, 2024). Os padrões anômalos de ENOS vão oscilar entre dois extremos, com o *El Niño* em sua fase quente, e *La Niña* na fase fria e podem variar a intensidade entre fraco, moderado, forte e muito forte (Kayano *et al.*, 2016).

No Brasil, a variabilidade climática e ambiental da região Nordeste é regida por fatores de circulação atmosférica, que são influenciados pelas anomalias de temperatura da superfície do mar (TSM) (Ferreira; Kemenes, 2023). No Piauí a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e Anticiclone do Atlântico, em conjunto com os ventos alísios do Nordeste, influenciam a precipitação pluviométrica na região (Nascimento *et al.*, 2019).

Além dos fenômenos naturais, as mudanças climáticas são consequências diretas do aquecimento global, que consiste no aumento das temperaturas médias da Terra causando ondas de calor, tempestades, secas, inundações e outros fenômenos (Dias; Matos, 2023). Essas alterações, cada vez mais extremas, ocasionam alterações direta e indiretamente em corpos aquáticos, em sua estrutura e funcionamento físico, químico e biológico, que podem ser percebidas de várias maneiras e escalas (Gerhard *et al.*, 2023).

Buscando a conservação de ambientes aquáticos, diversas técnicas de monitoramento podem ser aplicadas. O Sensoriamento Remoto oferece variadas alternativas de observação de um corpo d'água, desde a detecção e mapeamento à caracterização bio-óptica, utilizando o efeito de absorção de luz da água, que tem uma reflectância menor dentro do espectro visível e infravermelho que outros alvos, facilitando sua aplicação (Moreira; Costa; Becker, 2023).

O uso de índices espectrais e sensores ativos e/ou passivos, de diferentes resoluções espaciais, espectrais e temporais, permitem diversos tipos de estudos como, detecção (Costa *et al.*, 2022), extração e monitoramento (Huang *et al.*, 2018), modelagem preditiva (Şerban; Maftai; Dobrică, 2022), qualidade da água (Batina; Krtalić, 2024; Costa; Claudino-Sales; Carvalho, 2023), volume de reservatórios (Barbosa *et al.*, 2021; Pereira *et al.*, 2020; Toledo Junior *et al.*, 1983), variação de espelhos d'água (Barbosa *et al.*, 2019; Barbosa *et al.*, 2021; Pizani *et al.*, 2022), entre outros.

Estudos sobre a dinâmica de lagoas costeiras ainda são escassos no Piauí, porém necessários e urgentes para implementação de políticas públicas no que tange à conservação dos usos de recursos naturais da região. Os estudos recentes estão representados por Mesquita, Lima e Santos Filho (2018a), que analisaram a Lagoa do Portinho para compreender os motivos de sua seca quase total ocorrida em 2014; Andrade, Gomes e Cruz (2019) avaliaram o uso e ocupação da Lagoa do Portinho, em Parnaíba, Piauí; Sena e Silva (2020) observaram a dinâmica de variação da área da Lagoa do Sobradinho, em Luís Correia; e Sousa (2019), que delimitou o zoneamento geoecológico do complexo fluviomarinho dos rios Cardoso/Camurupim e porção costeira adjacente, trazendo características sobre a Lagoa da Santana e outros ambientes aquáticos da região.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

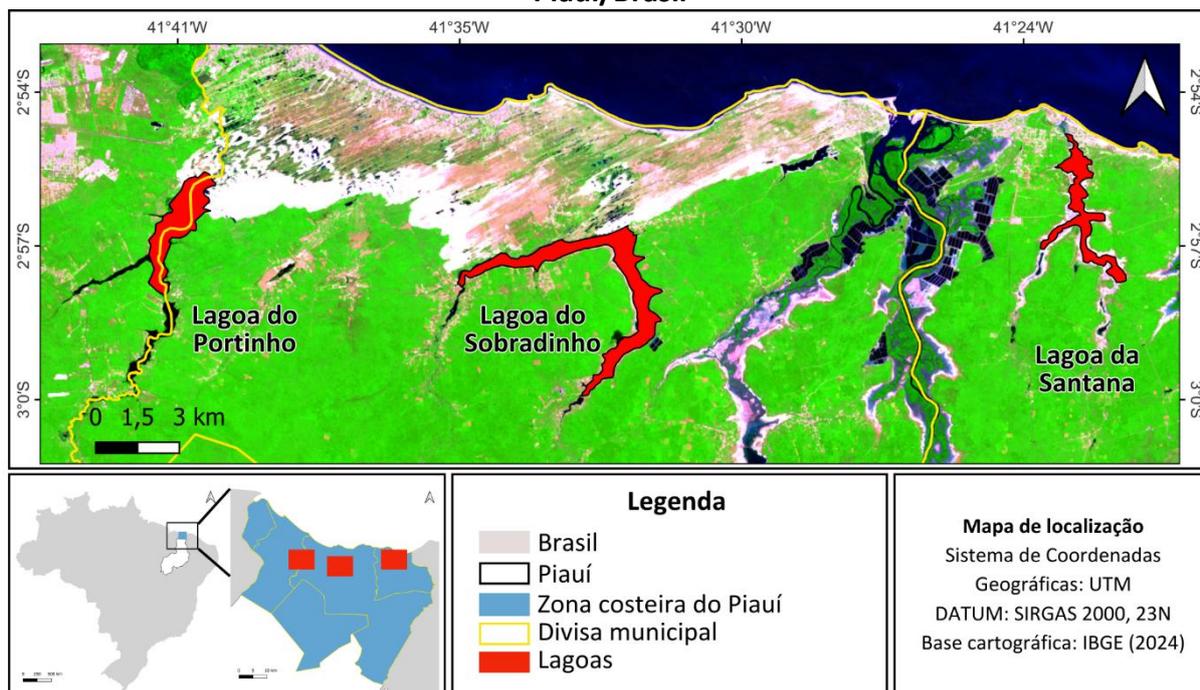
#### 3.1 Área de estudo

A zona costeira do Piauí é formada pelos municípios de Bom Princípio do Piauí, Cajueiro da Praia, Ilha Grande, Luís Correia e Parnaíba, conforme a portaria nº 34 do Ministério do Meio Ambiente (Brasil, 2021). Segundo a classificação de Köppen, o clima da região é “Aw”, caracterizado como megatérmico, com verão chuvoso e inverno quente, temperatura média de 27,5 °C, meses mais chuvosos entre janeiro e maio e de menores índices pluviométricos entre julho e dezembro (Ferreira; Kemenes, 2023; Santos Filho; Almeida; Zickel, 2013). Esta região possui solos originários de sedimentos do Terciário e do Quaternário, com classe textural variando de arenosa a argilosa (Valladares *et al.*, 2023). Sua vegetação é dividida em sete formações vegetacionais: vegetação pioneira psamófila; vegetação subperenifólia de dunas; vegetação perenifólia de mangue; vegetação de várzea; vegetação do Delta dos rios Parnaíba/Longá; vegetação estacional de tabuleiros e vegetação estacional secundária de cerradão (Santos Filho, 2009).

O litoral do Piauí é o menor do Brasil, contando com 66 km de linha de costa, onde podem ser encontradas áreas estuarinas, como o Delta do rio Parnaíba, os estuários dos rios Cardoso/Camurupim e Timonha/Ubatuba, além de áreas de dunas móveis ou fixas, lagoas, restingas e mangue em sua planície litorânea (Brasil, 2001). Para este estudo foram selecionadas três lagoas costeiras: Lagoa do Portinho, Lagoa do Sobradinho e Lagoa/lagamar da Santana, situadas em três municípios da zona costeira piauiense (Figura 1).

A Lagoa do Portinho, com área de aproximadamente 5 km<sup>2</sup>, localiza-se na divisa dos municípios de Luís Correia e Parnaíba (Figura 2), é formada pelo barramento por dunas do Rio Portinho e Riacho Brandão, seu tributário com maior contribuição no fluxo de água e volume, em comparação com os outros córregos a montante da lagoa (Mesquita; Lima; Santos Filho, 2018a). Por ser uma área com rica diversidade biológica, presença de sítios arqueológicos (Mendes Junior; Silva, 2011), exploração por mineração, atividades de turismo, lazer e expansão urbana (Sousa; Bacelar; Sousa, 2024), em 2019 foi criada a ARIE da Lagoa do Portinho, a partir de estudos de compensação ambiental da instalação de uma usina de produção de cachaça no sul do Piauí.

**Figura 1: Localização das lagoas do Portinho, Sobradinho e Santana na zona costeira do Piauí/Brasil**



Fonte: Os Autores, 2025.

A Lagoa do Sobradinho é localizada no município de Luís Correia, a 20 km da sede municipal, possui uma extensão de aproximadamente 16 km, em formato de U e é cortada por uma rodovia próximo a comunidade Bezerra Morto (Figura 2). Sousa (2019) considera que a lagoa é formada por fluxo pluvial, fluvial e freático, enquanto Baptista (2016) categoriza sua origem como residual, formada pela transgressão e regressão marinha, o que justificaria suas águas salgadas e salobras, dependendo do período sazonal local, pois possuiu um canal de alimentação, interrompido pela movimentação das dunas, que chega à praia do Arrombado, entre as praias de Carnaubinha e Itaqui (Brasil, 2001).

Situada na Zona de Uso Comunitário dentro da APA do Delta do rio Parnaíba (ICMBIO, 2020), a Lagoa do Sobradinho possui potencial turístico, em virtude de sua beleza cênica, e é utilizada, principalmente, para o cultivo de tilápia e camarão, embora a pesca não represente mais a principal atividade da região devido ao baixo nível das águas e, conseqüente, processo de salinização (Sena; Silva, 2020).

A Lagoa/Lagamar da Santana (Figura 2), por sua vez, pertence ao município de Cajueiro da Praia, situada na Zona de Uso Moderado dentro da APA do Delta (ICMBIO, 2020). Influenciada pela interação fluvial, lagunar e marinha, a Lagoa da Santana forma um sistema estuarino-lagunar na desembocadura do rio Santana, que deságua na praia da Barrinha, favorecendo a formação de um

alinhamento rochoso, devido ao contraste da salinidade entre a água doce e salgada, que leva a precipitação do carbonato sobre a costa (Sousa, 2019). No período de preamar, principalmente nas marés de sizígia, há o aumento do volume represado da lagoa, intensificando o processo de salinização (Sousa, 2019). O processo de urbanização e desenvolvimento turístico no município de Cajueiro da Praia acentua a fragilidade da Lagoa da Santana, devido ao acúmulo de lixo e descarte de efluentes (Ribeiro, 2019; Sousa, 2022).

**Figura 2: Vista aérea das lagoas do Portinho, Sobradinho e Santana na zona costeira do Piauí/Brasil**



Fonte: Os Autores, 2025.

### 3.2 Coleta e análise dos dados

#### 3.2.1 Precipitação pluviométrica

Para a caracterização sazonal, os dados de precipitação pluviométrica durante o período de estudo e para a série histórica de 50 anos (1974 a 2023) foram obtidos utilizando banco de dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2025), coletados nas estações pluviométricas convencional 82287 e automática A308, da Agência Nacional de Águas (ANA, 2025), nas estações convencionais 241001 e 241002 e do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN, 2025), na estação automática 220770201A, da cidade de Parnaíba, Piauí. Para tabulação dos dados, elaboração de gráficos e análise dos valores médios e totais mensais e totais anuais de precipitação, foi utilizado o software Excel 2019.

### 3.2.2 Sensoriamento Remoto

Para a delimitação de cursos e corpos d'água, aplicaram-se índices espectrais diretamente no ambiente da plataforma *Google Earth Engine* (GEE). Inicialmente foi utilizado o índice *Normalized Difference Water Index* (NDWI), que calcula a diferença normalizada entre bandas espectrais específicas e é eficaz na identificação de alvos aquáticos. No entanto, considerando suas limitações em áreas urbanizadas, adotou-se o *Modified Normalized Difference Water Index* (MNDWI), conforme proposto por Xu (2006). O MNDWI substitui a banda do infravermelho próximo (NIR) pelo infravermelho de ondas curtas (SWIR) no cálculo da diferença normalizada, aumentando a sensibilidade à detecção de superfícies aquáticas e reduzindo a confusão com áreas urbanas. Sua fórmula é expressa como:

$$MNDWI = \frac{(Green - SWIR)}{(Green + SWIR)}$$

Onde:

Green: banda verde;

SWIR: banda do infravermelho de ondas curtas.

A aplicação do índice foi realizada por meio de *scripts* desenvolvidos em linguagem Java Script no editor de código do GEE.

Foram utilizadas imagens das coleções Landsat 5 e Landsat 8, disponíveis no GEE (Landsat 5: <https://code.earthengine.google.com/1c959a7d1dbd1fef57a86ae8eb37c35e>; Landsat 8: <https://code.earthengine.google.com/da52c2d125e0bcc276c39adb689d4b4a>). Para o ano de 2013, empregou-se a coleção LANDSAT/LT05/C02/T1\_L2, composta por imagens com correção atmosférica, fornecendo valores de reflectância da superfície e temperatura terrestre, derivados do sensor TM (Thematic Mapper). Para os anos de 2015, 2017, 2019, 2021 e 2023, utilizou-se a coleção LANDSAT/LC08/C02/T1\_L2, proveniente do Landsat 8, com correções atmosféricas aplicadas e dados dos sensores OLI/TIRS (Operational Land Imager / Thermal Infrared Sensor).

A área de estudo foi estabelecida a partir de uma feição vetorial importada no GEE, utilizada tanto para o recorte espacial das imagens quanto para a delimitação das análises. A qualidade dos dados foi assegurada por meio da aplicação de uma máscara de nuvens baseada na banda QA\_PIXEL, utilizando operações *bitwise* para remover pixels afetados por nuvens, sombras e neve. Após a aplicação da máscara, os valores de reflectância foram corrigidos pelo fator de escala de 0,0001, conforme especificação dos produtos Landsat de Nível 2.

As imagens foram submetidas ao cálculo dos índices espectrais NDWI e MNDWI. O NDWI foi derivado da diferença normalizada entre as bandas verde (SR\_B2) e infravermelho próximo (SR\_B4), enquanto o MNDWI foi calculado entre as bandas verde (SR\_B2) e infravermelho de ondas curtas (SR\_B5), proporcionando maior acurácia na detecção de corpos d'água em cenários urbanos e com solos expostos.

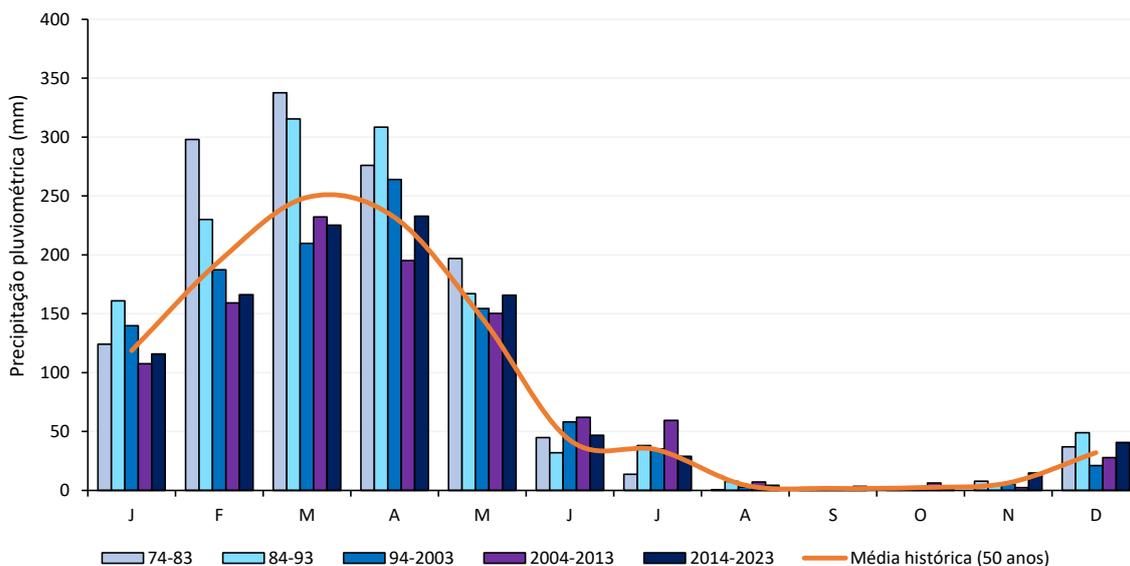
As séries temporais processadas foram compostas a partir do valor do percentil 90 do MNDWI, representando as condições de maior disponibilidade hídrica para cada período sazonal, considerando o período chuvoso, nos meses de janeiro a maio, e o seco, de junho a dezembro. As imagens MNDWI resultantes foram binarizadas mediante aplicação de limiar, classificando como presença de água os pixels com valores positivos. Posteriormente, as imagens binarizadas foram vetorizadas utilizando a função “.reduceToVectors”, com parâmetros de conectividade definidos e resolução compatível com a escala dos dados, possibilitando a extração de polígonos representativos das áreas alagadas.

Os produtos gerados, compostos pelas imagens processadas e pelos vetores extraídos, foram exportados para o *Google Drive* em formatos compatíveis com Sistemas de Informações Geográficas (SIG), permitindo análises espaciais dos valores médios em hectares e porcentagem das dinâmicas hídricas ao longo dos anos estudados.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A dinâmica sazonal observada para o município de Parnaíba na média histórica de 50 anos (1974-2023), divide-se em dois períodos distintos: o período chuvoso, nos meses de janeiro a maio e o período seco, com menor acúmulo de precipitação, abrangendo os meses de junho a dezembro (Figura 3). Os meses de março e abril compõem o pico de chuva na região, já nos meses de setembro, outubro e novembro ocorre o período, popularmente, conhecido na região como “B-R-O BRÓ”, em que é comum a ausência de registro de precipitação.

**Figura 3: Média mensal histórica de 50 anos (1974 a 2023) e precipitação total mensal por década no município de Parnaíba, Piauí/Brasil**

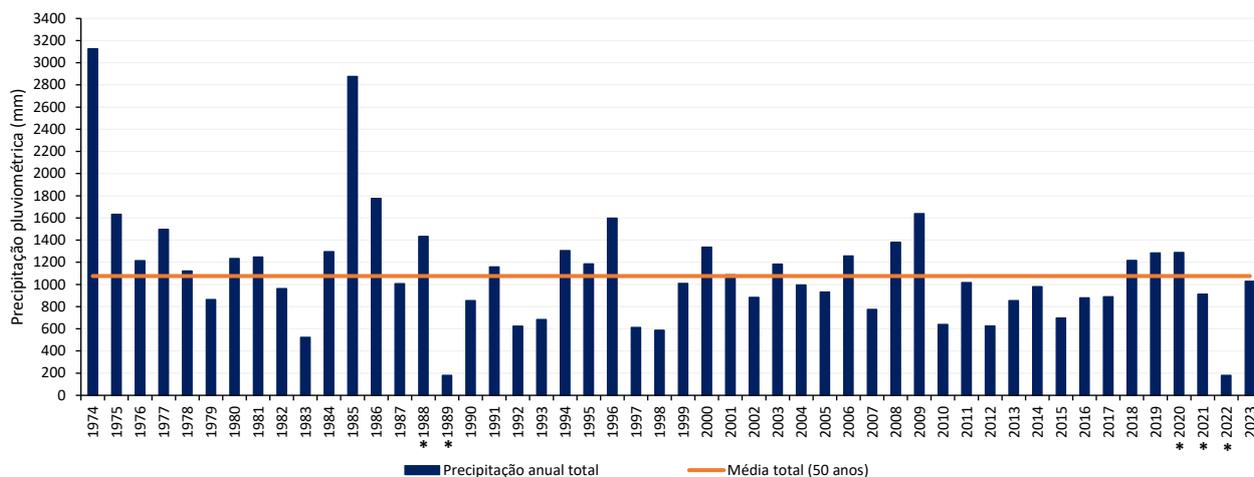


Fonte: INMET, 2025; ANA, 2025; CEMADEM, 2025.

Na comparação entre os valores de precipitação total mensal por década é possível observar, além da redução do volume das chuvas, que nas décadas de 1974 a 1983 e de 1984 a 1993, valores acima da média histórica ocorriam, principalmente, no primeiro trimestre, de janeiro a março, comportamento que se foi modificando nas décadas seguintes, com maiores valores no segundo trimestre, de abril a junho. Silva *et al.* (2025) destacam a redução de 11% na média de precipitação para o estado do Piauí, comparando os períodos de 1961 a 1990 e 1981 a 2010, que está associada à mudança nos padrões termopluviométricos no Nordeste brasileiro nos últimos 50 anos, onde as temperaturas apresentaram aumento e o padrão das precipitações mostrou-se mais aleatório e heterogêneo.

A partir de 2010 os valores de precipitação total apresentaram-se abaixo da média histórica de 50 anos, registrada na cidade de Parnaíba, de 1.075 mm (Figura 4) e da média anual do Brasil, de 1.760 mm (ANA, 2023). Os anos de 2010, 2012 e 2015 apresentaram os menores valores, com 637,9, 624,8 e 696,5, respectivamente. Não foram encontrados dados completos para o ano de 2022, porém as chuvas registradas no referido ano foram próximas ou acima da média em grande parte da região Nordeste, conforme dados do INMET (2023).

**Figura 4: Precipitação total anual (1974 a 2023), valor máximo mensal e média total no município de Parnaíba, Piauí/Brasil. \*Anos com dados incompletos**



Fonte: INMET, 2025; ANA, 2025; CEMADEM, 2025.

O principal fator de formação de precipitação na região é a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) em conjunto com a brisa marítima e terrestre, os ventos alísios de nordeste e os vórtices ciclônicos de altos níveis (Medeiros; Cavalcanti; Duarte, 2020).

Ferreira e Kemenes (2023) ao analisarem 30 anos (1991 a 2020) das variações climáticas em Parnaíba observaram que a precipitação e o *El Niño* tiveram relação oposta, pois o fenômeno esteve ausente no período de 2013 a 2014 e em 2020, podendo indicar a presença do fenômeno *La Niña*, e presente no período de 2015-2016 (*El Niño* extraforte) e 2017-2019 (*El Niño* fraco). Já o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) indicou que no ano de 2013 ocorreu *La Niña*; em 2014 e 2015 *El Niño*; de 2016 a 2018, neutralidade ENOS, com baixa precipitação; em 2019, neutralidade do *El Niño*, com chuvas acima da média histórica; 2020 e 2021, *La Niña* e em 2023, *El Niño* (INPE, 2024).

A dinâmica da sazonalidade na região da zona costeira do estado do Piauí é afetada pela intensidade das anomalias de Temperatura da Superfície do Mar (TSM). Em anos de *El Niño*, geralmente, há menor precipitação, enquanto em anos de *La Niña*, há ocorrência de precipitação acima da média (Batista; Rodrigues; Silva, 2024; INPE, 2024).

As características climáticas e os ecossistemas aquáticos da região semiárida brasileira são influenciados pelos eventos climáticos extremos, associados à variabilidade dos oceanos Atlântico, Pacífico e Índico após eventos *El Niño* e *La Niña* (Santos et al., 2024). O episódio *El Niño* entre 2015 e 2016 é classificado como um dos mais fortes desde 1950 (Fuentes-Aguilera et al., 2024), ocasionando impactos econômicos, sociais e ambientais na região (Lima et al., 2017).

Em relação à lâmina d'água superficial, registrou-se valor médio de 289,31 ha na Lagoa do

Portinho, 439,24 ha na Lagoa do Sobradinho e 235,23 ha na Lagoa da Santana, durante o período estudado. Entre o período chuvoso e seco, ao longo de 2013 a 2023, observou-se uma redução do espelho d'água das lagoas, sendo: 49,39 ha na Lagoa da Santana, 39,51 ha na Lagoa do Sobradinho e 11,68 ha na Lagoa do Portinho. O comportamento da variação de área das lagoas mostra semelhanças com as mudanças na precipitação durante o mesmo período.

A diferença de área ao se comparar os anos de 2013 e 2023 mostram que, ao longo do tempo, as lagoas do Portinho e Sobradinho tiveram aumento de área no período chuvoso de 15,83 % e 2,83 % e no período seco de 17,42% e 8,85%, respectivamente. Já a Lagoa da Santana diminuiu 14,30% de seu espelho d'água durante as chuvas e aumentou 15,56% no período seco (Tabela 1).

A redução da lâmina de água pode estar relacionada às características geológicas da região, pois a zona costeira do Piauí faz parte da Bacia Sedimentar do rio Parnaíba que, por sua maior permeabilidade em relação a áreas de geologia cristalina, favorece o abastecimento do aquífero (Zanella, 2014). Assim, apesar do aumento da temperatura, a facilidade da transferência de água superficial diminui sua exposição à radiação solar e consequente evaporação durante o período seco (Barbosa, A. *et al.*, 2022).

**Tabela 1: Valores de área média dos períodos chuvoso (C) e seco (S) das lagoas do Portinho, Sobradinho e Santana, Piauí/Brasil, entre os anos de 2013 e 2023**

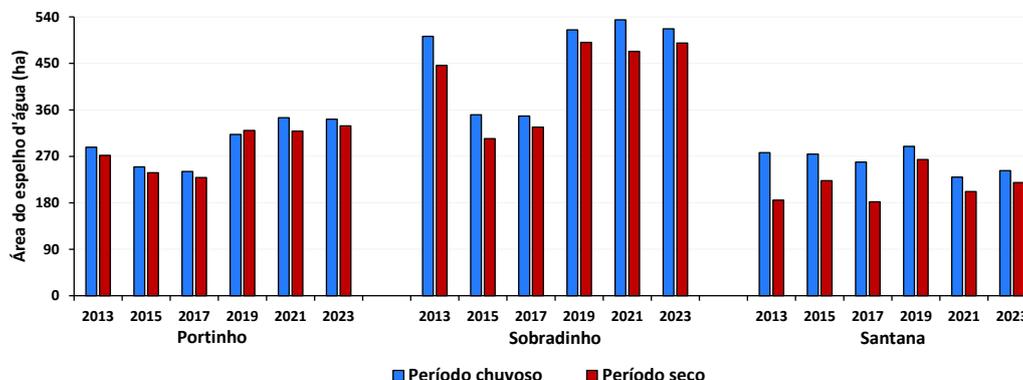
Lagoas	2013		2023		Perda/Ganho de área (ha)		Perda/Ganho de área (%)	
	C	S	C	S	C	S	C	S
Portinho	287,76	271,78	341,87	329,10	54,11	57,32	15,83	17,42
Sobradinho	502,48	446,23	517,12	489,53	14,64	43,30	2,83	8,85
Santana	276,96	185,09	242,32	219,19	-34,64	34,11	-14,30	15,56

Fonte: Os Autores, 2025.

A área das lagoas apresentou uma diminuição acentuada de 2013 até 2017 quando voltaram a aumentar, concomitantemente ao aumento da precipitação (Figura 5). A lagoa do Portinho demonstrou menor variação entre os períodos chuvoso e seco em cada ano, com recuperação de área acima do registrado para o ano de 2013. A lagoa do Sobradinho teve maior redução de área em 2015-2017, com recuperações nos anos seguintes acima dos valores de 2013. A lagoa da Santana sofreu menores variações durante os anos estudados, devido à influência das marés em seu abastecimento, porém com maior perda de área ao longo do tempo, pois, distintamente das demais, mostra maior diferença entre os períodos chuvoso e seco. Nos anos de menor precipitação (2013 a 2017), observa-se maior perda de área no período seco que nos anos seguintes, o que pode

estar relacionada a maiores valores de evapotranspiração no período de 2010 a 2016 (Ferreira; Kemenes, 2023).

**Figura 5: Variação da lâmina superficial d'água em hectares das lagoas do Portinho, Sobradinho e Santana, no período chuvoso e seco, de 2013 a 2023**



Fonte: Os Autores, 2025.

O baixo índice pluviométrico, a distribuição irregular de chuvas e alta taxa de evaporação, características da região semiárida do nordeste (Gomes; Zanella, 2023), foram intensificadas de 2010 a 2016, período registrado por Lima *et al.* (2017) como a maior seca em 100 anos. Ao comparar as normais climatológicas de 1961-1990 e de 1991-2020, Ferreira e Kemenes (2023) constataram o aumento de 2 % na taxa de evapotranspiração real e redução de 60 % do regime de chuvas.

Para Mesquita, Lima e Santos Filho (2018b), os impactos naturais na Lagoa do Portinho, como a redução da precipitação e vazão dos rios e o avanço das dunas sobre o leito da lagoa, somados aos impactos antrópicos, acentuaram a redução de área, levando à quase extinção da lagoa. A influência de ações como barragem construída em propriedade privada, ocasionando a restrição da descarga fluvial do rio Portinho à montante da lagoa (Galvão, 2015), captação de água para piscicultura, desmatamento, agricultura e pastagem, bem como a dinâmica natural da ação eólica e atividades turísticas de passeio nas dunas, também contribuíram para o aumento da fragilidade desse ecossistema frente a eventos climáticos intensos na região (Sousa; Bacelar; Sousa, 2024).

Na Lagoa do Sobradinho em 2015, Sena e Silva (2020) registraram uma redução de 4,02 km<sup>2</sup> comparado com o último ano de referência (2010), e ganho de 2,65 km<sup>2</sup> no ano de 2020 em comparação com 2015. Ao final do período estudado, a Lagoa da Santana teve perda 5,40 % de sua área, apesar de estar situada em uma planície fluviomarina que é abastecida diariamente no período de maior vazão da maré (Sousa, 2019) (Tabela 1).

Assim como na Lagoa do Sobradinho, a Lagoa da Santana possui uma estrada cortando seu fluxo natural, dificultando a passagem de água doce dos riachos que as alimentam em tempos de baixa pluviosidade, intensificando os efeitos do processo de salinização (Cavalcanti; Camargo, 2000; Cunillera-Montcusí *et al.*, 2022). Nesses canais fluviais e nas lagoas o assoreamento é acelerado pelo desmatamento e queimadas sistemáticas, que facilitam, ao longo do tempo, a migração de sedimentos trazidos pelo vento (Andrade; Gomes; Cruz, 2019; Cavalcanti; Camargo, 2000).

As belezas do litoral piauiense tornam a região propícia para o fluxo de visitantes nacionais e internacionais em busca de atividades turísticas, impactando tanto positiva quanto negativamente, em diversas escalas e esferas (Braga; Guzzi, 2021; Vieira; Araújo, 2015). Cavalcanti e Camargo (2000) já alertavam sobre o impacto da especulação imobiliária com a construção de casas e meios de hospedagem próximo às lagoas do Portinho, Sobradinho e Santana e suas respectivas áreas de inundação.

O aumento da pegada de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) (Melo *et al.*, 2023), a construção de salinas e tanques de carcinicultura (Sousa; Valladares; Espíndola, 2016), a falta de infraestrutura de transporte, descarte de rejeitos sólidos, abastecimento de água e tratamento de esgoto nos municípios da zona costeira do Piauí (Borges, 2022; Braga; Guzzi; Malta, 2023) são fatores que aumentam o grau de vulnerabilidade dessas áreas de planície fluvio-lacustre e fluvio-marinha (Barbosa, D. *et al.*, 2022).

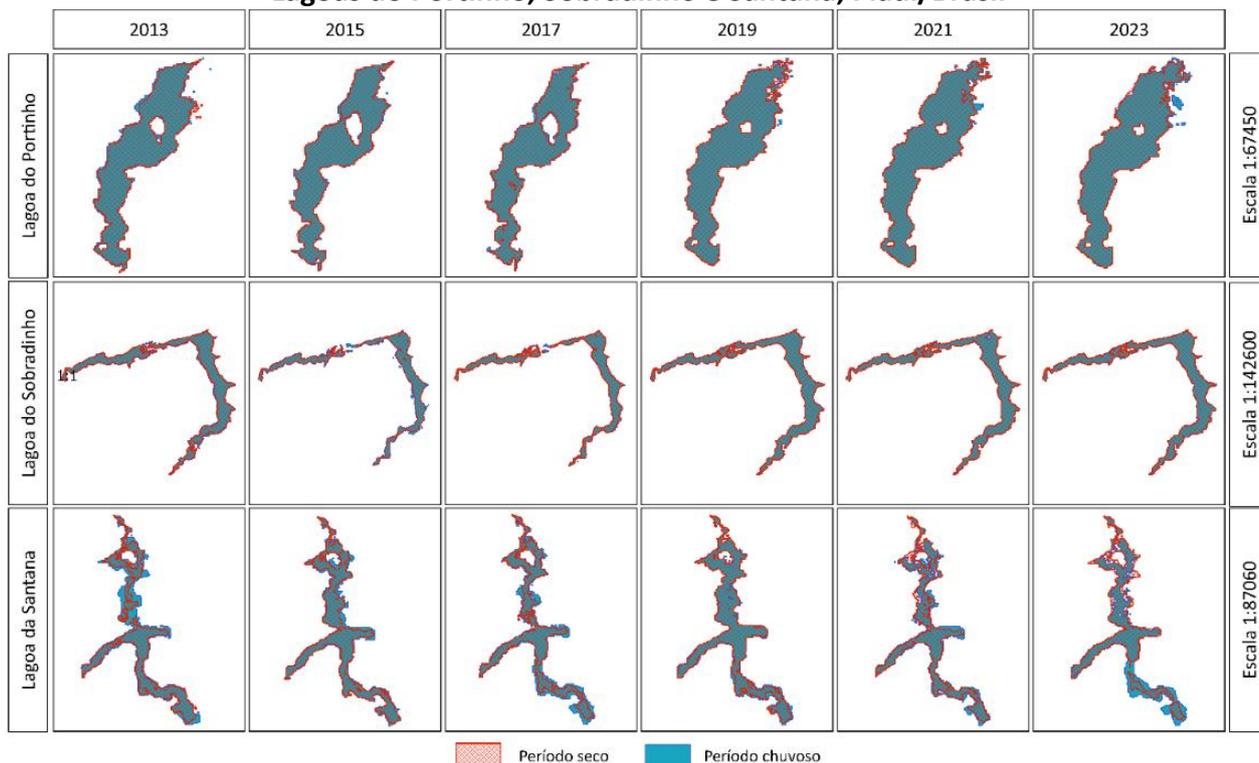
A dinâmica da variação da lâmina d'água superficial mostrou que, em relação à perda máxima de área, comparando o maior valor no período chuvoso e menor valor no período seco, houve na Lagoa do Sobradinho o ganho máximo de 43,08 % de área, em Santana 37,06 % e Portinho de 33,67 % (Tabela 3). A menor área registrada na Lagoa do Portinho ocorreu em 2017, com 228,83 ha, na Lagoa do Sobradinho em 2015, com 304,27 ha e na Lagoa da Santana em 2017, com 181,96 ha (Tabela 2, Figura 6).

**Tabela 2: Valores de área mínima, máxima e perda máxima em hectares e porcentagem das lagoas do Portinho, Sobradinho e Santana, no período de 2013 a 2023, Piauí/Brasil**

Lagoas	Ano	Área mínima (ha)	Ano	Área máxima (ha)	Ganho máximo (ha)	Ganho máximo (%)
Portinho	2017	228,83	2021	344,99	116,16	33,67
Sobradinho	2015	304,27	2021	534,53	230,25	43,08
Santana	2017	181,96	2019	289,10	107,14	37,06

Fonte: Os Autores, 2025.

**Figura 6: Dinâmica da lâmina d'água no período chuvoso e seco no período de 2013 a 2023 nas Lagoas do Portinho, Sobradinho e Santana, Piauí/Brasil**



Fonte: Os Autores, 2025.

Para Nascimento *et al.* (2019), o período com anos secos está cada vez mais longo, com a redução hídrica impulsionada por mudanças climáticas globais. A variabilidade da precipitação de um ano para outro, que está relacionada aos fenômenos atmosféricos, causa interferência na dinâmica e qualidade dos recursos hídricos, muitas vezes, limitando seus múltiplos usos (Gomes; Zanella, 2023). Os ecossistemas aquáticos lacustres sofrem a interferência natural e antrópica na sua biodiversidade e funcionamento, o que afeta direta e indiretamente as sociedades humanas que dependem deles em níveis econômicos e de saúde (Cunillera-Montcusí *et al.*, 2022). O uso do sensoriamento remoto permite preencher lacunas de conhecimento que contribuam para o avanço significativo e o desenvolvimento concomitante de melhores estratégias de gestão e conservação desses ambientes.

A Secretaria do Meio Ambiente e Recurso Hídricos (Semarh/PI), desde 2012, possui uma Sala de Monitoramento e previsão de eventos climáticos no Estado, em colaboração com a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). Porém, somente a partir de agosto de 2023 o compartilhamento de tecnologias e dados, que possibilitam maior exatidão às previsões hidrológicas nos períodos de estiagem e chuvas do estado, foi implementado (Santos, 2023).

A previsão e monitoramento de parâmetros ambientais (hidrometeorológico, queimadas, desmatamentos, urbanização, etc), bem como a modernização de processos, equipamentos e equipe técnica, são ações essenciais para a tomada de decisão governamental, que a partir do auxílio do Sensoriamento Remoto tornam dinâmica a divulgação de dados, inclusive para a população geral.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A dinâmica de redução e expansão da lâmina d'água superficial das lagoas do Portinho, Sobradinho e Santana sofreu consequência direta dos eventos climáticos extremos, como *El Niño*, que ocasionou índices pluviométricos abaixo da média histórica, principalmente no período de 2010 a 2017, e da redução gradativa dos índices de precipitação pluviométrica e modificação do ciclo sazonal da região nos últimos 50 anos.

No período estudado, a maior redução de área nas lagoas ocorreu de 2013 a 2017, seguida de recuperação nas lagoas do Portinho e Sobradinho com ganhos superiores ao estágio inicial em 2013, enquanto na lagoa da Santana percebeu-se diminuição de área. Contudo, as características geológicas da região, as hidrológicas de cada lagoa e suas formas de usos múltiplos, podem ter contribuído para os cenários apresentados. Ações antrópicas como barramento de rios e riachos tributários, construção de estradas que cortam as lagoas, expansão urbana sem planejamento e assoreamento pela movimentação das dunas, seja natural ou por consequências do turismo, atuam como importantes interferências nesses ambientes aquáticos. Dessa forma, sugere-se o monitoramento para a atualização e implementação das políticas públicas para a conservação desses ambientes.

A aplicação de técnicas e recursos de sensoriamento remoto para monitoramento e análise da dinâmica da área de lâmina d'água das lagoas demonstrou ser uma abordagem ágil e eficaz para o estudo. A disponibilidade de dados geoespaciais, imagens de sensoriamento remoto sem custos e geotecnologias adequadas permitiu uma integração eficiente em sua aplicação, contribuindo para a expansão nos estudos da dinâmica ambiental e impactos antrópicos, assim como para geração de dados importantes para subsidiar a gestão dos recursos hídricos na zona costeira do estado do Piauí.

## REFERÊNCIAS

- ADRIAN, R. *et al.* Lakes as sentinels of climate change. **Limnology and Oceanography**, [S. l.], v. 54, n. 6, p. 2283–2297, 2009. Disponível em: [https://aslopubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.4319/lo.2009.54.6\\_part\\_2.2283](https://aslopubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.4319/lo.2009.54.6_part_2.2283). Acesso em: 22 out. 2023.
- ANA. **Espelhos d'água**. Atlas Geográfico Digital de Recursos Hídricos do Brasil. [S. l.], 2013. Disponível em: <https://portal1.snirh.gov.br/atlasrh2013/>. Acesso em: 28 out. 2024.
- ANA. **Estatísticas de Chuvas e Vazões**. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/3ec95f52-d294-4102-807f-e71c56959fde>. Acesso em: 20 out. 2024.
- ANA. **Séries Históricas de Estações**. Hidroweb. [S. l.], 2025. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>. Acesso em: 3 maio 2025.
- ANDRADE, A. L. M.; GOMES, A. C. A.; CRUZ, M. L. B. da. A importância do geoprocessamento na análise do uso e ocupação da Lagoa do Portinho localizada entre os municípios de Luís Correia e Parnaíba-PI. **Revista Cadernos de Ensino, Ciências & Tecnologia**, [S. l.], v. 1, n. especial, p. 144–158, 2019. Disponível em: <https://revistas.uece.br/index.php/CECIT/article/view/799/8606>. Acesso em: 1 nov. 2024.
- BAPTISTA, E. M. de C. Geomorfologia e Geodiversidade do litoral piauiense para fins de Geoconservação. **Revista de Geociências do Nordeste**, [S. l.], v. 2, n. especial, p. 1250–1258, 2016. Disponível em: <https://periodicos.ufrn.br/revistadoregne/article/view/10591/7505>. Acesso em: 1 nov. 2024.
- BARBOSA, A. H. da S. *et al.* Dinâmica dos espelhos d'água dos reservatórios da Bahia: uma aplicação a partir do Sensoriamento Remoto. **Caderno de Geografia**, [S. l.], v. 32, n. 70, p. 1000–1030, 2022. Disponível em: <https://periodicos.pucminas.br/geografia/article/view/27664>. Acesso em: 2 nov. 2024.
- BARBOSA, A. H. da S. *et al.* Seis anos de seca: análise espaço-temporal dos espelhos d'água dos reservatórios do Ceará por Sensoriamento Remoto. **Revista Brasileira de Geografia Física**, [S. l.], v. 14, n. 4, p. 2220–2241, 2021. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/index.php/rbgfe/article/view/244978>. Acesso em: 12 dez. 2024.
- BARBOSA, A. H. da S. *et al.* Sensoriamento remoto aplicado a análise dos espelhos d'água dos principais reservatórios do Rio Grande do Norte. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 19., 2019, Santos. **Anais [...]**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2019. p. 867–870. Disponível em: <https://proceedings.science/sbsr-2019/trabalhos/sensoriamento-remoto-aplicado-a-analise-dos-espelhos-dagua-dos-principais-reserv?lang=pt-br#>. Acesso em: 2 mar. 2024.
- BARBOSA, D. L. dos S. *et al.* Vulnerabilidade ambiental da área de proteção ambiental delta do

Parnaíba. **Brazilian Journal of Development**, [S. l.], v. 8, n. 6, p. 45227–45239, 2022. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/49183>. Acesso em: 30 out. 2024.

BATINA, A.; KRTALIĆ, A. Integrating Remote Sensing methods for monitoring lake water quality: a comprehensive review. **Hydrology**, [S. l.], v. 11, n. 7, p. 1–27, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/hydrology11070092>. Acesso em: 30 out. 2024.

BATISTA, F. F.; RODRIGUES, D. T.; SILVA, C. M. S. e. Analysis of climatic extremes in the Parnaíba River Basin, Northeast Brazil, using GPM IMERG-V6 products. **Weather and Climate Extremes**, [S. l.], v. 43, e100646, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wace.2024.100646>. Acesso em: 30 out. 2024.

BORGES, G. K. L. Lazer, turismo e a produção imobiliária no litoral do Piauí. **Pensar Geografia**, [S. l.], v. 6, n. 2, p. 46–65, 2022. Disponível em: <https://periodicos.apps.uern.br/index.php/PGEO/article/view/3731>. Acesso em: 28 out. 2024.

BRAGA, S. de S.; GUZZI, A. Organização espacial da atividade turística no litoral piauiense. **Mercator**, Fortaleza, v. 20, e20024, 2021. Disponível em: <http://www.mercator.ufc.br/mercator/article/view/e20024>. Acesso em: 26 out. 2024.

BRAGA, S. de S.; GUZZI, A.; MALTA, G. A. P. Análise dos territórios turísticos do litoral piauiense por meio de Analytic Hierarchy Process. **Mercator**, Fortaleza, v. 22, e22007, 2023. Disponível em: <http://www.mercator.ufc.br/mercator/article/view/e22007>. Acesso em: 26 out. 2024.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Portaria MMA nº 34, de 2 de fevereiro de 2021. Aprova a listagem atualizada dos municípios abrangidos pela faixa terrestre da zona costeira brasileira. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, n. 34, p. 53, 3 fev. 2021. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-mma-n-34-de-2-de-fevereiro-de-2021-302053267>. Acesso em: 21 out. 2024.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Políticas para o Desenvolvimento Sustentável. **Zoneamento Ecológico-Econômico do Baixo Rio Parnaíba - relatório preliminar: fase de diagnóstico**. Brasília, DF: MMA/SDS, 2001. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/2357>. Acesso em: 22 out. 2024.

CAVALCANTI, A. P. B.; CAMARGO, J. C. G. Impactos e condições ambientais da zona costeira do Estado do Piauí. In: GERARDI, L. H. de O.; MENDES, I. A. (org.). **Do Natural, do Social e de suas Interações**: visões geográficas. Rio Claro: USP/DGH, 2000. p. 59–78.

CEMADEN. **Mapa interativo da rede observacional para monitoramento de risco de desastres naturais**. [S. l.], 2025. Disponível em: <https://mapainterativo.cemaden.gov.br/#>. Acesso em: 3 maio 2025.

COSTA, E. de C. P. *et al.* Mapeamento multitemporal e cadastral das salinas da Lagoa de Araruama - RJ. **GEOgraphia**, [S. l.], v. 24, n. 53, e50112, 2022. Disponível em: <https://periodicos.uff.br/geographia/article/view/42595/>. Acesso em: 2 out. 2024.

COSTA, G. L. da; CLAUDINO-SALES, V. de; CARVALHO, A. M. de. Análise ambiental da Área de Proteção Ambiental (APA) do Lagamar do Cauípe - Ceará. **Revista Territorium Terram**, [S. l.], v. 6, n. 8, p. 1–18, 2023. Disponível em: [http://www.seer.ufsj.edu.br/territorium\\_terram/article/view/5242/](http://www.seer.ufsj.edu.br/territorium_terram/article/view/5242/). Acesso em: 20 nov. 2024.

CUNILLERA-MONTCUSÍ, D. *et al.* Freshwater salinisation: a research agenda for a saltier world. **Trends in Ecology & Evolution**, [S. l.], v. 37, n. 5, p. 440–453, 2022. Disponível em: <http://www.cell.com/article/S0169534721003402/fulltext>. Acesso em: 21 nov. 2024.

DIAS, R.; MATOS, F. Impactos das mudanças climáticas nos recursos hídricos: desafios e implicações para a humanidade. **Revista Sociedade Científica**, [S. l.], v. 6, n. 1, p. 1571–1603, 2023. Disponível em: <https://revista.scientificsociety.net/wp-content/uploads/2023/09/Art00172-2023.pdf>. Acesso em: 30 out. 2024.

ESTEVES, F. de A. **Fundamentos de Limnologia**. 3. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2011.

FERREIRA, L. G. C.; KEMENES, A. A influência dos eventos climáticos extremos na climatologia da planície litorânea piauiense. **Revista Brasileira de Climatologia**, [S. l.], v. 32, n. 19, p. 634–657, 2023. Disponível em: <https://ojs.ufgd.edu.br/rbclima/article/view/16349/>. Acesso em: 13 out. 2024.

FUENTES-AGUILERA, P. *et al.* Recovery of time series of water volume in Lake Ranco (South Chile) through satellite altimetry and its relationship with climatic phenomena. **Water**, [S. l.], v. 16, n. 14, p. 1–20, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4441/16/14/1997>. Acesso em: 25 out. 2024.

GALVÃO, V. **Parecer técnico-científico: lagoa livre**. [S. l.: s. n.], 2015.

GERHARD, M. *et al.* Environmental variability in aquatic ecosystems: avenues for future multifactorial experiments. **Limnology and Oceanography Letters**, [S. l.], v. 8, n. 2, p. 247–266, 2023. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/lol2.10286>. Acesso em: 21 nov. 2024.

GOMES, F. I. B. P.; ZANELLA, M. E. Histórico, causas e características da semiaridez do Nordeste do Brasil. **Geografares**, [S. l.], v. 37, p. 1–20, 2023. Disponível em: <https://journals.openedition.org/geografares/10409>. Acesso em: 24 out. 2024.

HUANG, C. *et al.* Detecting, extracting, and monitoring surface water from space using optical sensors: a review. **Reviews of Geophysics**, [S. l.], v. 56, n. 2, p. 333–360, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2018RG000598>. Acesso em: 18 out. 2024.

ICMBIO. **Plano de manejo da área de proteção ambiental Delta do Parnaíba**. Brasília, DF: Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade, 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/icmbio/pt-br/assuntos/biodiversidade/unidade-de-conservacao/unidades-de-biomas/marinho/lista-de-ucs/apa-delta-do-parnaiba>. Acesso em: 2 out. 2024.

INMET. **Estado do clima no Brasil em 2022**. Brasília – DF: INMET, 2023. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/uploads/notastecnicas/Estado-do-clima-no-Brasil-em-2022-OFICIAL.pdf>. Acesso em: 2 maio 2025.

INMET. **Banco de dados meteorológicos**. [S. l.], 2025. Disponível em: <https://bdmep.inmet.gov.br/>. Acesso em: 3 maio 2025.

INPE. **Condições atuais do ENOS**. [S. l.], 2024. Disponível em: <http://enos.cptec.inpe.br/>. Acesso em: 2 fev. 2025.

KAYANO, M. T. *et al.* El Niño e La Niña dos últimos 30 anos: diferentes tipos. **Revista Climanalise**, [S. l.], v. 4, p. 7–12, 2016. Disponível em: <http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/revista/pdf/30anos/Kayanoetal.pdf>. Acesso em: 29 out. 2024.

LIMA, M. G. de *et al.* Secas de 2010 a 2016 no Piauí: impactos e respostas do Estado em articulação com os programas nacionais. **Parcerias Estratégicas**, Brasília, v. 22, n. 44, p. 155–180, 2017. Disponível em: [https://seer.cgee.org.br/parcerias\\_estrategicas/article/view/850](https://seer.cgee.org.br/parcerias_estrategicas/article/view/850). Acesso em: 26 set. 2024.

MEDEIROS, R. M. de *et al.* A Lagoa do Portinho - Piauí, Brasil e suas contribuições ao turismo e meio ambiente. **RECIMA21 - Revista Científica Multidisciplinar**, [S. l.], v. 3, n. 2, e321177, 2022. Disponível em: <https://recima21.com.br/index.php/recima21/article/view/1177/>. Acesso em: 30 out. 2024.

MEDEIROS, R. M. de; CAVALCANTI, E. P.; DUARTE, J. F. de M. Classificação climática de Köppen para o estado do Piauí - Brasil. **Revista Equador**, [S. l.], v. 9, n. 3, p. 82–99, 2020. Disponível em: <https://comunicata.ufpi.br/index.php/equador/article/view/9845/>. Acesso em: 21 out. 2024.

MELO, R. de S. *et al.* Pegada de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) dos visitantes do município de Cajueiro da Praia (PI). **Revista Brasileira de Ecoturismo**, São Paulo, v. 16, n. 2, p. 252–270, 2023. Disponível em: <https://periodicos.unifesp.br/index.php/ecoturismo/article/view/13910>. Acesso em: 30 out. 2024.

MENDES JUNIOR, J. Q.; SILVA, J. C. O povo das dunas na Lagoa do Portinho, Piauí, Brasil. **International Journal of South American Archaeology**, [S. l.], n. 9, p. 6–18, 2011. Disponível em: <https://ijsa.syllabapress.us/issues/articles/ijsa00048/ijsa00048.pdf>. Acesso em: 30 out. 2024.

MESQUITA, T. K. da S.; LIMA, I. M. de M. F.; SANTOS FILHO, F. S. Lagoa fluvial do rio Portinho, Piauí: impactos socioambientais recentes. In: BARBOSA, L. N. *et al.* (org.). **Análise de impactos e riscos ambientais em bacias hidrográficas**. Mossoró-RN: EDUERN, 2018a. p. 91–102. Disponível em: [http://www.ppggeografia.ufc.br/images/documentos/C7T3\\_compressed.pdf#page=91](http://www.ppggeografia.ufc.br/images/documentos/C7T3_compressed.pdf#page=91). Acesso em: 30 out. 2024.

MESQUITA, T. K. da S.; LIMA, I. M. de M. F.; SANTOS FILHO, F. S. Cadê a lagoa que estava aqui? Estudo de caso da Lagoa do Portinho, litoral do Piauí (Brasil). **Revista Brasileira de Geografia**

**Física**, [S. l.], v. 11, n. 1, p. 346–356, 2018b. Disponível em:

<https://periodicos.ufpe.br/revistas/index.php/rbgfe/article/view/234206>. Acesso em: 30 out. 2024.

MOREIRA, C. V. M.; COSTA, M. R. A. da; BECKER, V. Impacts of extreme precipitation events in water quality: a scientometric analysis in global scale. **Acta Limnologica Brasiliensia**, [S. l.], v. 35, e17, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S2179-975X0223>. Acesso em: 30 out. 2024.

NASCIMENTO, M. G. P. *et al.* Climatological trends for the municipality of Parnaíba Piauí/Brazil. **Journal of Hyperspectral Remote Sensing**, [S. l.], v. 9, n. 1, p. 10–20, 2019. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/index.php/jhrs/article/view/239775/pdf>. Acesso em: 13 out. 2024.

PEREIRA, J. D. A. *et al.* Uso do sensoriamento remoto para monitoramento da redução das águas do complexo curema-mãe d'água. **Brazilian Journal of Development**, [S. l.], v. 6, n. 3, p. 13954–13966, 2020. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/7880>. Acesso em: 15 out. 2024.

PIZANI, F. M. C. *et al.* Técnicas de sensoriamento remoto para análise temporal do espelho d'água da Lagoa Grande na cidade de Sete Lagoas – MG. **Revista Geografias**, [S. l.], v. 17, n. 1, p. 81–102, 2022. Disponível em: <https://periodicos.ufmg.br/index.php/geografias/article/view/25893>. Acesso em: 24 out. 2024.

RIBEIRO, E. M. *et al.* Unidades de conservação costeiras e marinhas no Brasil . In: MUEHE, D.; LINS-DE-BARROS, F. M.; PINHEIRO, L. de S. (org.). **Geografia Marinha: oceanos e costas na perspectiva de geógrafos**. Rio de Janeiro: PGGM, 2020. p. 402–437. Disponível em: <https://www.pggmbrasil.org/publica%C3%A7%C3%B5es>. Acesso em: 27 out. 2024.

RIBEIRO, J. N. do A. *et al.* Métrica com base ecossistêmica para a caracterização e gestão de lagoas costeiras. **Revista Costas**, [S. l.], v. 2, n. 1, p. 105–144, 2020. Disponível em: <https://revistas.uca.es/index.php/costas/article/view/8942>. Acesso em: 20 out. 2024.

RIBEIRO, M. **Condomínio de luxo no litoral do Piauí é multado em R\$ 100 mil por obra sem autorização ambiental**. [S. l.], 2019. Disponível em: <https://infonewss.com/condominio-de-luxo-no-litoral-do-piaui-e-multado-em-r-100-mil-por-obra-sem-autorizacao-ambiental/>. Acesso em: 23 out. 2024.

SANTOS, A. L. M. dos *et al.* Space-time characterization of extreme precipitation indices for the semiarid region of Brazil. **Climate**, [S. l.], v. 12, n. 43, p. 1–17, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2225-1154/12/3/43>. Acesso em: 30 out. 2024.

SANTOS, R. **Semarh fortalece monitoramento climático no Piauí e emite mais de 300 boletins e alertas em 2023**. Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Piauí – SEMARH, [S. l.], 2023. Disponível em: <https://www.pi.gov.br/noticia/semarh-fortalece-monitoramento-climatico-no-piaui-e-emite-mais-de-300-boletins-e-alertas-em-2023>. Acesso em: 12 out. 2024.

SANTOS FILHO, F. S. **Composição florística e estrutural da vegetação de restinga do Estado do Piauí**. 2009. 124 f. Tese (Doutorado em Botânica) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2009. Disponível em: <https://1library.org/document/q73pddry-composicao-floristica-estrutural-da-vegetacao-restinga-estado-piaui.html>. Acesso em: 25 out. 2024.

SANTOS FILHO, F. S.; ALMEIDA JR, E. B.; ZICKEL, C. S. Do edaphic aspects alter vegetation structures in the Brazilian restinga? **Acta Botanica Brasílica**, [S. l.], v. 27, n. 3, p. 613–623, 2013. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/abb/a/xm8YWrKjdySmWcRnsKkfKJf/?format=pdf&lang=en>. Acesso em: 23 nov. 2024.

SENA, N. A.; SILVA, M. P. da. Monitoramento de recursos hídricos: estudo da Lagoa do Sobradinho em Luís Correia - PI. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL, 11., 2020, Vitória-ES. **Anais [...]**. Bauru-SP: IBEAS, 2020. Disponível em: <https://www.ibeas.org.br/congresso/congresso11.htm>. Acesso em: 2 out. 2024.

ȘERBAN, C.; MAFTEI, C.; DOBRICĂ, G. Surface water change detection via water indices and predictive modeling using remote sensing imagery: a case study of Nuntasi-Tuzla Lake, Romania. **Water**, [S. l.], v. 14, n. 4, p. 556, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4441/14/4/556/htm>. Acesso em: 18 out. 2024.

SILVA, A. D. G. da *et al.* Mudanças climáticas e variabilidade termopluiométrica na região Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, [S. l.], v. 36, p. 533–559, 2025. Disponível em: <https://ojs.ufgd.edu.br/rbclima/article/view/18695/10966>. Acesso em: 2 maio 2025.

SOUSA, A. **Teresa Britto denuncia crime ambiental em Cajueiro da Praia**. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://www.al.pi.leg.br/institucional/noticias/teresa-britto-denuncia-crime-ambiental-em-cajueiro-da-praia>. Acesso em: 23 out. 2024.

SOUSA, A. M.; BACELAR, F. K. R.; SOUSA, R. dos S. Dynamics of land use and coverage of the Portinho river water basin, coast of Piauí. **International Journal Semiarid**, [S. l.], v. 7, n. 7, p. 394–403, 2024. Disponível em: <https://journalsemiarid.com/index.php/ijsa/article/view/223>. Acesso em: 25 out. 2024.

SOUSA, R. dos S. **Zoneamento geológico do complexo fluviomarinho dos rios Cardoso/Camurupim e porção costeira adjacente, litoral leste piauiense**. 2019. 153 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019. Disponível em: <http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/49257>. Acesso em: 3 out. 2024.

SOUSA, R. dos S.; VALLADARES, G. S.; ESPÍNDOLA, G. M. de. Análise do índice de vegetação (NDVI) e vulnerabilidade ambiental da planície costeira do estado do Piauí. **Revista da Casa da Geografia de Sobral**, [S. l.], v. 18, n. 2, p. 82–99, 2016. Disponível em: <https://rcgs.uvanet.br/index.php/RCGS/article/view/304>. Acesso em: 3 nov. 2023.

SOUZA, E. M. da S. de; MOREIRA, L. C. de S. Avaliação da composição de espécies de macrófitas aquáticas em ecossistemas lênticos perenes do Parque das Dunas, Salvador (BA). **Revista Eletrônica Científica da UERGS**, [S. l.], v. 3, n. 4, p. 807–820, 2017. Disponível em: <https://revista.uergs.edu.br/index.php/revuergs/article/view/1172/264>. Acesso em: 15 nov. 2024.

TOLEDO JUNIOR, A. P. de *et al.* A aplicação de modelos simplificados para a avaliação do processo da eutrofização em lagos e reservatórios tropicais. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL*, 12., 1983, Balneário Camboriú. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: ABES; São Paulo: CETESB, 1983. Disponível em:

<https://repositorio.cetesb.sp.gov.br/handle/123456789/2546>. Acesso em: 30 out. 2024.

VALLADARES, G. S. *et al.* Análise espectral de solos do litoral piauiense. **Acta Geográfica**, Boa Vista, v. 16, n. 42, p. 120–138, 2023. Disponível em: <https://revista.ufrb.br/actageo/article/view/6002>. Acesso em: 27 out. 2024.

VASISTHA, P.; GANGULY, R. Water quality assessment of natural lakes and its importance: an overview. **Materials Today: Proceedings**, [S. l.], v. 32, p. 544–552, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.092>. Acesso em: 20 out. 2024.

VIEIRA, A. F.; ARAÚJO, J. L. L. Turismo e sustentabilidade ambiental na comunidade de Barra Grande, Cajueiro da Praia, Piauí (PI). **Revista Brasileira de Pesquisa em Turismo**, São Paulo, v. 9, n. 3, p. 519–536, 2015. Disponível em: <https://rbtur.org.br/rbtur/article/view/994>. Acesso em: 20 out. 2024.

WEYHENMEYER, G. A. *et al.* Global lake health in the Anthropocene: societal implications and treatment strategies. **Earth's Future**, [S. l.], v. 12, n. 4, e2023ef00438, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2023EF004387>. Acesso em: 24 out. 2024.

WOOLWAY, R. I.; SHARMA, S.; SMOL, J. P. Lakes in hot water: the impacts of a changing climate on aquatic ecosystems. **BioScience**, [S. l.], v. 72, n. 11, p. 1050–1061, 2022. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.1093/biosci/biac052>. Acesso em: 22 out. 2024.

XU, H. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. **International Journal of Remote Sensing**, [S. l.], v. 27, n. 14, p. 3025–3033, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/01431160600589179>. Acesso em: 30 out. 2024.

ZANELLA, M. E. Considerações sobre o clima e os recursos hídricos do semiárido nordestino. **Caderno Prudentino de Geografia**, [S. l.], v. 1, n. 36, p. 126–142, 2014. Disponível em: <https://revista.fct.unesp.br/index.php/cpg/article/view/3176>. Acesso em: 24 out. 2024.

*Artigo submetido em: 12/02/2025*

*Artigo aceito em: 09/06/2025*

*Artigo publicado em: 13/09/2025*



*Este é um artigo publicado com acesso aberto sob Licença Creative Commons  
Atribuição 4.0 Internacional (CC BY 4.0)*