

ANÁLISE DA DINÂMICA ESPAÇO-TEMPORAL DOS ESPELHOS D'ÁGUA DOS RESERVATÓRIOS DE PERNAMBUCO POR MEIO DE SENSORIAMENTO REMOTO

Antônio Helton da Silva Barbosa

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE
Coordenação Espacial do Nordeste, Natal, RN, Brasil
antonio.s.barbosa@inpe.br

Miguel Dragomir Zanic Cuellar

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE
Coordenação Espacial do Nordeste, Natal, RN, Brasil
miguel.cuellar@inpe.br

Melquisedec Medeiros Moreira

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE
Coordenação Espacial do Nordeste, Natal, RN, Brasil
melquisedec.moreira@inpe.br

Kátia Alves Arraes

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE
Coordenação Espacial do Nordeste, Natal, RN, Brasil
katia.arraes@inpe.br

Camila Saiury Pereira Silva

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE
Coordenação Espacial do Nordeste, Natal, RN, Brasil
camila.saiury@inpe.br

RESUMO

Nos últimos anos, em meio à seca e crise hídrica que afetaram várias regiões do Brasil, em particular a região semiárida, os reservatórios vêm sendo constantemente monitorados. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi analisar, por meio de Sensoriamento Remoto, a dinâmica dos espelhos d'água dos reservatórios de Pernambuco, a fim de mostrar como a área dos espelhos d'água foi afetada pelas baixas precipitações, compreendendo os anos de 2012 a 2017. Para isso, foi utilizada a plataforma *Google Earth Engine* para analisar imagens do Landsat. Para a delimitação das águas, foi utilizada uma técnica de realce para converter as imagens RGB para HVS, criando uma imagem pancromática e facilitando o processo de identificação dos espelhos d'água. Desse modo, os resultados indicaram que todos os reservatórios perderam área, onde alguns chegaram a secar completamente. Além disso, os resultados ainda sugerem que os reservatórios localizados nas bacias hidrográficas de clima mais úmido apresentaram menor perda de área em comparação com as de clima mais seco. Essas informações são extremamente importantes para o planejamento e a gestão ambiental dos recursos hídricos, sob a perspectiva de fomentar políticas de abastecimento e, com isso, ampliar a capacidade de enfrentar problemas relacionados à segurança hídrica.

Palavras-chave: Semiárido. Recursos hídricos. Seca. Google Earth Engine. Landsat.

ANALYSIS OF THE SPATIO-TEMPORAL DYNAMICS OF WATER MIRRORS IN PERNAMBUCO RESERVOIRS THROUGH REMOTE SENSING

ABSTRACT

In recent years, in the midst of the drought and water crisis that has affected several regions of Brazil, in particular the semiarid region, reservoirs have been constantly monitored. In this context, the objective of this work was to analyze, through Remote Sensing, the dynamics of water mirrors in Pernambuco reservoirs, in order to show how the area of water mirrors was affected by low rainfall, from 2012 to 2017. For this, the Google Earth Engine platform was used to analyze Landsat images. For water delimitation, an enhancement technique was used to convert RGB images to HVS, creating a panchromatic image and facilitating the process of identifying water mirrors. Thus, the results indicated that all reservoirs lost area, and some came to dry completely. Furthermore, the results also suggest that the reservoirs located in the hydrographic basins with the wettest climate presented lower area loss compared to those with drier climates. This information is extremely important for the planning and environmental management of water resources, from the perspective of

fostering supply policies and, therefore, expanding the capacity to face problems related to water security.

Keywords: Semiarid. Water resources. Drought. Google Earth Engine. Landsat.

INTRODUÇÃO

As precipitações abaixo da média e os eventos de seca extrema observada nos últimos anos (CUNHA et al., 2019), resultaram em uma crise hídrica que afetou substancialmente várias regiões do Brasil e, em particular, a região semiárida no período que compreendeu os anos de 2012 a 2017.

Nesse contexto de secas recorrentes, os eventos de secas graves, assim como as reservas hídricas superficiais, vêm sendo constantemente estudados e monitorados, principalmente devido à importância dos recursos hídricos para o suporte à vida e ao desenvolvimento socioeconômico da região semiárida do Brasil.

As águas doces superficiais constituem uma pequena fração dos recursos hídricos existentes no planeta. Entretanto, o seu valor econômico e social para as populações humanas é inestimável, considerando que estas águas são as mais acessíveis. Além disso, podemos dizer que as águas doces superficiais fornecem uma gama de serviços ecossistêmicos abrangentes para toda a vida (POSTEL; DAILY; EHRLICH, 1996; PEKEL et al., 2016).

Desse modo, a gestão das reservas hídricas superficiais é uma questão ambiental crítica, principalmente em regiões áridas e semiáridas, sendo importante quantificar a sua distribuição espacial e temporal, tanto localmente quanto regionalmente (TULBURE e BROICH, 2019). Entender a dinâmica espaço-temporal da superfície dos corpos d'água constitui a base para a compreensão do efeito das chuvas para o desenvolvimento socioeconômico e ambiental (TULBURE e BROICH, 2013).

Nesse contexto, o Sensoriamento Remoto oferece uma gama de alternativas para a observação contínua deste recurso natural, permitindo diversas aplicações, como a detecção, o mapeamento, e a caracterização bio-óptica dos corpos d'água em larga escala (BARBOSA; NOVO; MARTINS, 2019).

Devido ao efeito da absorção de luz, os corpos d'água têm uma reflectância espectral relativamente menor do que outros alvos de superfície no espectro visível e infravermelho, tornando os corpos d'água facilmente detectáveis (YAN; SHAKER; LAROCQUE, 2019).

Várias são as técnicas de Sensoriamento Remoto para a identificação de corpos d'água (ELSAHABI; NEGM; TAHAN, 2016). Esse conjunto de possibilidades abrange desde o uso de vários índices espectrais (MISHRA e PRASAD, 2015; DU et al., 2016; HUANG et al., 2016); e tipos de sensores, sejam eles ativos (PHAM-DUC; PRIGENT; AIRES, 2017) e/ou passivos (MUELLER et al., 2016); de diferentes resoluções espaciais (SARP e OZCELIK, 2017; CHEN et al., 2018), espectrais e temporais (COOLEY et al., 2017).

A utilização do Sensoriamento Remoto para o estudo e monitoramento dos recursos hídricos são muito diversificados e de grande relevância. As medições por satélite e outras plataformas também são uma fonte de informações para permitir o mapeamento das águas superficiais do ecossistema aquático em planícies de inundação, rios, canais, lagos e reservatórios (SOUZA et al., 2019).

Outros exemplos são as aplicações em pesquisas para classificação de corpos d'água (KO; KIM; NAM, 2015); monitoramento da qualidade da água (XU et al., 2021), do volume em reservatórios (DUAN e BASTIAANSEN, 2013), da dinâmica espacial global da água (PICKENS et al., 2020) e mapeamento territorial (MOREIRA, 2002; MOREIRA et al., 2018)

Nas últimas décadas, as técnicas de Sensoriamento Remoto e dos seus produtos têm apresentado grandes aplicabilidades para o monitoramento e gestão dos recursos hídricos. Além disso, ainda é capaz de analisar extensas áreas em menor tempo e com melhor custo-benefício com o advento da computação em nuvem e do *Big Data*.

Assim, em virtude do número elevado de reservatórios existentes em Pernambuco e diante da relevância dos recursos hídricos para o desenvolvimento do semiárido, o propósito deste trabalho foi mapear e analisar, por meio de Sensoriamento Remoto, a dinâmica dos espelhos d'água dos principais reservatórios do estado de Pernambuco, a fim de mostrar como a área dos espelhos d'água dos reservatórios foi afetada pelas precipitações abaixo da média durante os últimos seis anos de seca, compreendendo os anos de 2012 a 2017.

METODOLOGIA

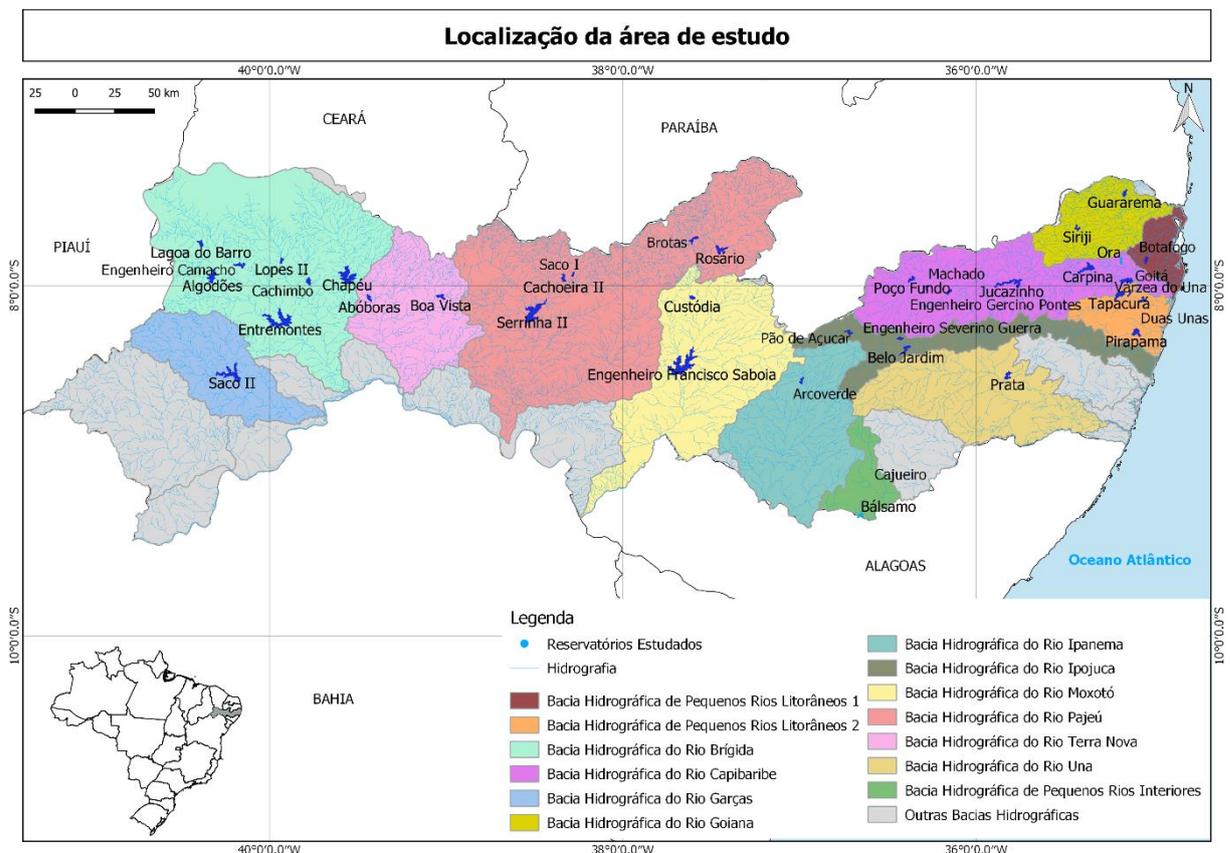
Área de estudo

A área de estudo engloba os principais reservatórios inseridos nas principais regiões hidrográficas de Pernambuco, como mostra a Figura 1. O estado de Pernambuco foi dividido em 29 Unidades de Planejamento Hídrico (UPH), caracterizando assim, a Divisão Hidrográfica Estadual, composta de 13 Bacias Hidrográficas. Além disso, existem 06 Grupos de Bacias de Pequenos Rios Litorâneos (GL1 a GL6), 09 Grupos de Bacias de Pequenos Rios Interiores (GI1 a GI9) e uma bacia de pequenos rios que compõem a rede de drenagem do arquipélago de Fernando de Noronha (PERHPE, 1998).

Nessas 13 divisões hidrográficas (Goiana, Capibaribe, Ipojuca, Sirinhaém, Una, Mundaú, Ipanema, Moxotó, Pajeú, Terra Nova, Brígida, Garças e Pontal), foram construídos vários reservatórios a fim de se criarem reservas hídricas superficiais para promover o uso múltiplo das águas e diminuir a vulnerabilidade a secas e inundações.

Desse modo, para alcançar os objetivos propostos na pesquisa, foram mapeados os reservatórios estratégicos para o abastecimento do estado de Pernambuco e que possuem capacidade hídrica acima de 6 milhões de m³. Tais informações foram coletadas a partir de dados disponibilizados pela Agência Nacional de Águas (ANA), Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS) e Agência Pernambucana de Águas e Climas (APAC).

Figura 1 - Localização dos reservatórios estudados, drenagens e limites das bacias hidrográficas de Pernambuco.



Fonte - Autores (2021).

Fatores geoambientais

A disposição dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos depende de muitas relações mútuas, sobretudo de uma avaliação integrada dos fatores climáticos, geomorfológicos, geológicos, pedológicos e

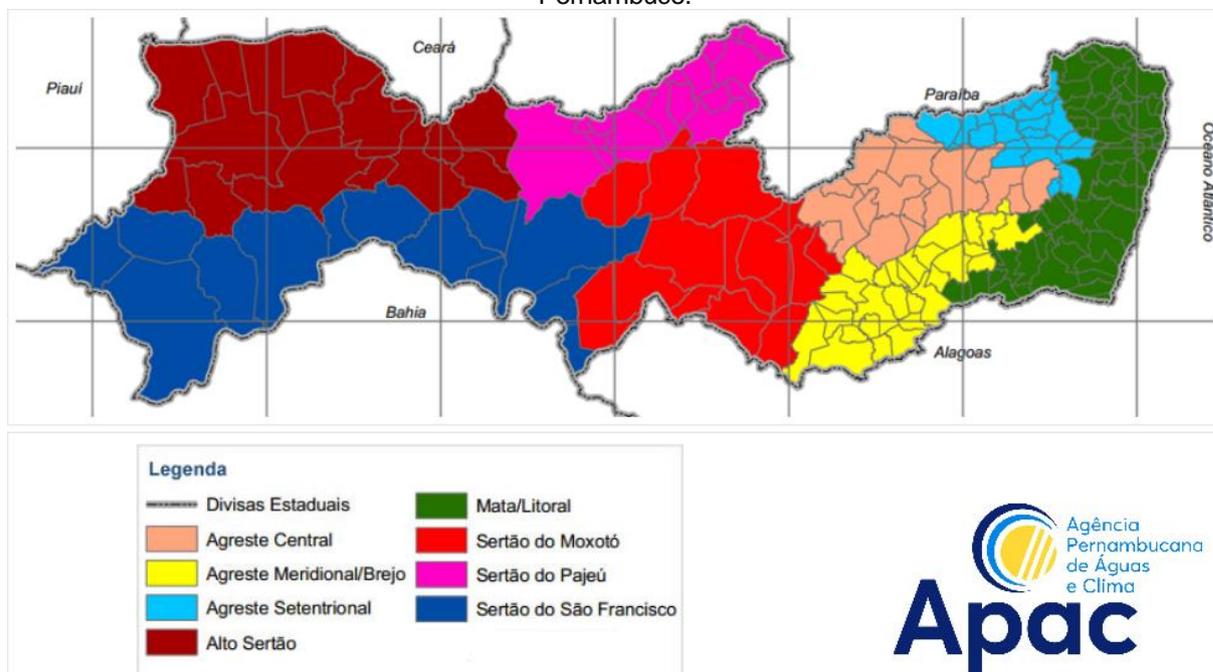
tipo de cobertura vegetal. Somam-se a isso as modificações realizadas pelas atividades humanas, como construções de barragens, perfuração de poços, transposição de rios etc. Assim, a análise integrada do meio físico-biótico por esses fatores permite um melhor entendimento sobre as relações dos componentes ambientais e o comportamento das reservas hídricas frente aos eventos de seca.

O Estado de Pernambuco apresenta predominantemente climas do tipo semiárido, representando cerca de 70% da área total, caracterizando-se por baixos índices pluviométricos anuais, com valores oscilando entre 500 e 800 mm, estando situado nos sertões Pernambucanos e em parte do Agreste, nas outras localidades observam-se precipitações acima de 1000 mm caracterizando climas subúmido no agreste e úmido na zona da mata e litoral. No Sertão, com exceção do período chuvoso que vai de janeiro a abril, os valores de evaporação real e potencial são superiores à precipitação média mensal, com pequeno ou nenhum excesso de água, em média (APAC, 2013).

De forma simplificada, Pernambuco se caracteriza pela presença de dois tipos de clima, o tropical úmido e o semiárido. Na maior parte de seu território predomina o clima semiárido/tropical. Já a porção úmida e subúmida do Estado concentra-se no litoral e nas áreas que registram maior elevação topográfica, como, por exemplo, as regiões da chapada do Araripe e do planalto da Borborema.

Como forma de facilitar a compreensão climática, assim como da distribuição espacial das chuvas em Pernambuco, a APAC estabeleceu limites para as regiões climáticas por meio do estabelecimento de regiões pluviométricas homogêneas. As regiões pluviométricas homogêneas são regiões com características similares de volumes pluviométricos e de período chuvoso. A figura 2 apresenta a espacialização das oito microrregiões pluviométricas do Estado. Essas microrregiões podem ainda ser simplificadas e agrupadas em três grupos: Zona da Mata/Litoral, Agreste e Sertão. Na região da Zona da Mata, a precipitação média é em torno de 1.321 mm, sendo a região mais chuvosa e de clima mais úmido. A região do Agreste (Central, Meridional/Brejo e Setentrional) apresenta uma faixa de precipitação maior e com média 768,6 mm. Já a região do Sertão (Moxotó, Pajeú e São Francisco) ocupa a maior parte do Estado e possui uma média pluviométrica de aproximadamente 624 mm, sendo a região de clima mais seco (APAC, 2017).

Figura 2 - Microrregiões de pluviometrias homogêneas do estado de Pernambuco.

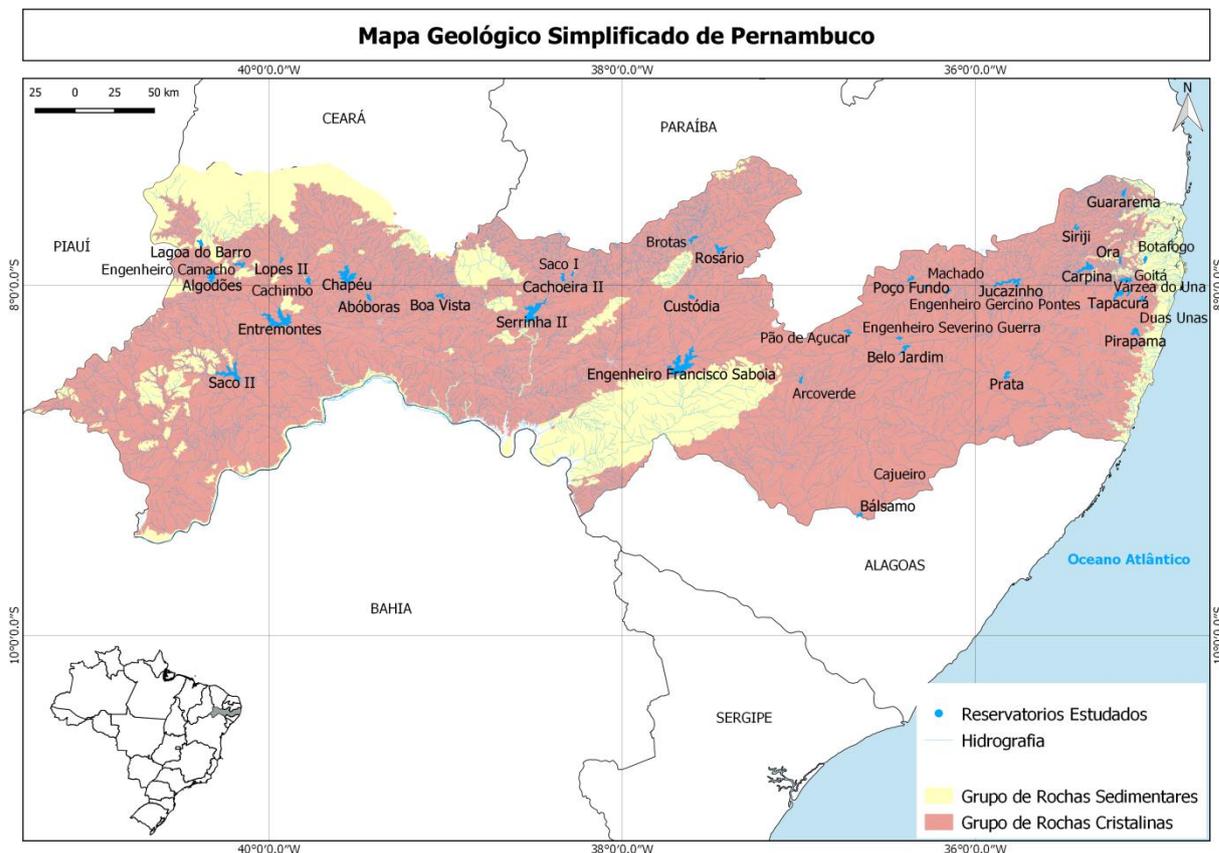


Fonte - APAC (2021).

Em termos de relevo, Pernambuco comporta características de um conjunto de fatores, abrigando em seu território regiões de baixa e média altitude na depressão sertaneja e no litoral, assim como locais de altitude mais elevadas como o planalto da Borborema e a chapada do Araripe. Já a sua estrutura

geológica complexa pode ser simplificada em grupos de rochas sedimentares e rochas cristalinas. Estas últimas, ocupam a maior parte do Estado, conforme pode ser observado na figura 3.

Figura 3 - Mapa Geológico Simplificado do estado de Pernambuco.



Fonte - adaptado da CPRM, 2010.

Identificação dos espelhos d'água e processamento dos dados

Para realizar o mapeamento espacial e temporal do comportamento dos espelhos d'água das principais reservas hídricas superficiais do estado de Pernambuco durante o período de 2012 a 2017, no qual foram registradas precipitações abaixo da média, utilizou-se a plataforma do *Google Earth Engine* (GEE), uma avançada plataforma de processamento de dados geoespacial baseada em nuvem, feita principalmente para análises de dados ambientais em escala planetária (big data); assim como o QGIS, um Sistema de Informação Geográfica (SIG) livre e gratuito de visualização, edição e análise de dados.

Como produtos do Sensoriamento Remoto, foi utilizado um conjunto de imagens dos satélites Landsat 7 e Landsat 8. No GEE foram carregadas as imagens dos satélites Landsat 7 para os anos de 2012 e 2013, e Landsat 8 para os anos de 2014 a 2017; sendo todas as imagens referentes ao mês de janeiro, em virtude deste mês marcar o início do período chuvoso na região. Logo depois, foi realizada a composição colorida RGB 3-4-5 para as imagens do sensor ETM/Landsat 7, e 6-5-4 para o OLI/Landsat 8.

Em seguida, para determinar áreas com superfície de água, denominadas "espelhos d'água", foi utilizado a técnica de conversão da imagem RGB para HSV (IHS ou HLS) (*Intensity, Hue, Saturation*), criando uma imagem pancromática utilizando a componente *Hue*.

A extração dos corpos d'água por meio desta técnica de realce consiste em desagregar a informação espectral das componentes matiz (*Hue*) e saturação (*Saturation*), e a espacial na componente intensidade (*Intensity*), contribuindo no realce de objetos e feições (FLORENZANO, 2011).

Dessa forma, foi utilizada a banda matiz, ou seja, o componente *Hue* para gerar uma imagem pancromática com informações sobre os alvos de superfície onde os corpos d'água se diferenciam dos outros alvos, facilitando o processo de identificação e extração dos espelhos d'água.

A aplicação de procedimentos de identificação e extração de informações para o mapeamento das reservas hídricas superficiais com o uso da técnica de realce de conversão das imagens RGB dos sensores dos satélites Landsat para HSV é uma metodologia ativa e amplamente conhecida, sendo, dessa forma, utilizada neste estudo.

Posteriormente, foram exportados do GEE as imagens correspondentes aos valores de *Hue* (espelhos d'água) da área de estudo. Em sequência, os dados matriciais foram importados para o QGIS para a etapa de processamento e quantificação das áreas dos espelhos d'água.

Assim, foi possível realizar uma análise visual preliminar sobre a dinâmica de contração e expansão dos corpos d'água ao longo dos seis anos mapeados, bem como subsidiar as análises quantitativas de tais mudanças. Na sequência, com os dados de área ocupada, foram elaborados gráficos, tabelas e mapas temáticos sobre o comportamento espacial e temporal dos espelhos d'água. O mapeamento e quantificação das áreas permitiram observar o comportamento e dinâmica de ganho e perda dos espelhos d'água em Pernambuco.

Além disso, para poder relacionar a diminuição dos espelhos d'água com a redução das precipitações, foi elaborado um gráfico das precipitações médias anuais das mesorregiões de Pernambuco para o período de 2011 a 2017, com os dados de 126 postos pluviométricos disponibilizados no site da APAC. Cabe destacar que foi escolhido o ano de 2011 como ano base para a análise da série temporal da precipitação média anual, pois foi entendido que o comportamento das áreas dos reservatórios do ano de 2012, ano base do mapeamento dos espelhos d'água, só poderia ser compreendido em sua totalidade com as informações das precipitações do ano anterior (2011), ajudando também na interpretação de toda a série temporal das precipitações e suas possíveis correlações com a diminuição ou crescimento das áreas dos espelhos d'água.

Ao todo foram mapeados 38 reservatórios, sendo oito na bacia Capibaribe, sete na bacia Brígida, cinco na bacia Pajeú, três na bacia Ipojuca, três na bacia Rios Litorâneos 2, dois na bacia Goiana, dois na bacia Moxotó, dois na bacia Mundaú, dois na bacia Terra Nova; e nas bacias Garças, Una, Ipanema e Rios Litorâneos 1, um reservatório em cada. Os resultados de todo o mapeamento estão disponíveis no sítio do Grupo de Geoprocessamento da Coordenação Espacial do Nordeste (COENE) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE): http://geopro.crn.inpe.br/RH_reser_Pernambuco.htm.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A tabela 1 mostra os valores das áreas dos espelhos d'água mapeadas para os meses de janeiro de cada ano, assim como apresenta o percentual da variação de área (ganho ou perda) durante o período estudado, tendo como base o ano de 2012, bem como apresenta a capacidade hídrica dos principais reservatórios estudados.

Os resultados das análises indicaram que dos oito reservatórios mapeados na bacia do rio Capibaribe, apenas as barragens de Carpina, Goitá, Orá e Várzea do Una mantiveram os espelhos d'água durante o período analisado, conforme pode ser observado na tabela 1. Entre os reservatórios citados, Goitá apresentou a maior redução, chegando a perder quase 46% de sua área. Já Carpina apresentou a segunda maior redução, com aproximadamente 30%, seguidos de Várzea do Uma e Orá, com 29,51% e 2,60%, respectivamente. O período de 2013 foi o mais crítico para todos eles, pois apresentaram a menor área inundada de toda a série.

A bacia do rio Capibaribe escoar para o Oceano Atlântico e constitui os chamados rios litorâneos, sendo um dos rios mais importantes da região metropolitana do Recife. Ao longo da bacia hidrográfica, as barragens exercem outra importante função para além do armazenamento de água para múltiplos usos, como por exemplo, o controle do fluxo de água para diminuir os efeitos das enchentes.

Tabela 1 - Variação temporal das áreas dos espelhos d'água dos reservatórios da bacia Capibaribe.

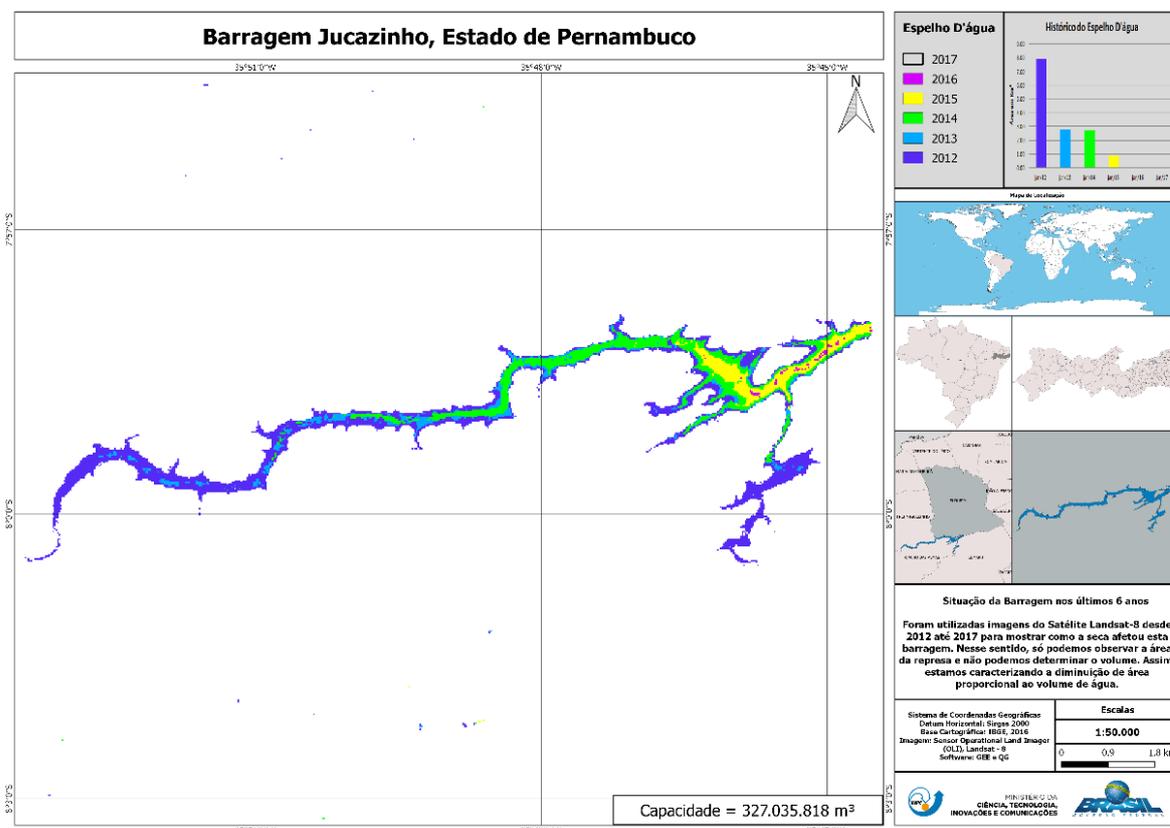
Reservatórios	Capacidade (m ³)	Área dos Espelhos D'Água (Km ²)						Variação Percentual de Área: (+) Ganho e (-) Perda
		2012	2013	2014	2015	2016	2017	
Carpina	270.000.000	6,21	3,61	5,31	5,08	4,84	4,30	- 30,76
Engenheiro Gercino Pontes	13.600.000	1,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	- 100,00
Goitá	52.000.000	3,01	1,38	2,36	2,26	1,96	1,64	- 45,51
Jucazinho	327.035.818	7,92	2,79	2,76	0,92	0,03	0,00	- 100,00
Machado	6.800.000	0,62	0,03	0,04	0,00	0,00	0,00	- 100,00
Orá	13.000.000	0,77	0,29	0,78	0,81	0,84	0,75	- 2,60
Poço Fundo	27.750.000	0,32	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	- 100,00
Várzea do Una	11.568.010	0,61	0,35	0,53	0,71	0,63	0,43	- 29,51

Fonte - Autores (2021).

Dentre os reservatórios que secaram completamente, cabe destacar a barragem de Jucazinho (Figura 4) que, mesmo apresentando a maior capacidade hídrica para a bacia do Capibaribe (327.035.818 m³), não conseguiu manter o seu espelho d'água no ano de 2017. Já os reservatórios de menor capacidade hídrica começaram a secar logo no ano de 2013 (Engenheiro Gercino e Poço Fundo) e em 2015 (Machado).

A realidade é que, além da ocorrência de precipitações abaixo da média e intensificação da seca nos últimos anos; a geografia local, o tamanho das áreas de drenagem, tipo de uso múltiplo e a capacidade hídrica podem ser a explicação para o quadro de escassez observado para algumas reservas hídricas.

Figura 4 - Dinâmica do espelho d'água do reservatório Jucazinho, Pernambuco.



Fonte - Autores (2021).

Na bacia do rio Brígida, localizada na microrregião pluviométrica do Alto Sertão, foram analisadas sete barragens. A exemplo do que houve na bacia do rio Capibaribe, as barragens com baixa capacidade hídrica da bacia Brígida também apresentaram grande dificuldade para manter seus espelhos d'água ao longo do período analisado. Dessa forma, quase todos os reservatórios apresentaram reduções superiores a 90%, conforme pode ser observado na tabela 2. A bacia do rio Brígida, que escoa para o rio São Francisco, compõe os chamados rios interiores, sendo um dos rios mais importantes do sertão de Pernambuco.

Tabela 2 - Variação temporal das áreas dos espelhos d'água dos reservatórios da bacia Brígida.

Reservatórios	Capacidade (m ³)	Área dos Espelhos D'Água (Km ²)						Variação Percentual de Área: (+) Ganho e (-) Perda
		2012	2013	2014	2015	2016	2017	
Algodões	54.481.872	6,57	3,83	2,52	1,43	0,50	0,02	- 99,70
Cachimbo	31.000.000	1,45	0,36	0,77	0,92	0,20	0,00	- 100,00
Chapéu	188.000.000	7,78	1,00	0,60	0,00	0,00	0,00	- 100,00
Engenheiro Camacho	27.664.500	2,14	0,59	0,36	0,06	0,00	0,45	- 78,97
Entremontes	339.333.700	3,83	1,13	3,40	3,31	1,60	0,26	- 93,21
Lagoa do Barro	13.161.975	3,26	2,36	0,69	0,45	0,11	0,01	- 99,69
Lopes II	23.935.360	1,14	0,49	0,50	0,67	0,14	0,02	- 98,25

Fonte - Autores (2021).

Nesse contexto, as barragens de Chapéu e Cachimbo apresentaram redução total em seus espelhos d'água durante o período analisado. O primeiro reservatório, independentemente de apresentar capacidade hídrica superior a 180 milhões de metros cúbicos, apresentou redução já no ano de 2015 e manteve esse quadro até o ano de 2017, perdendo 100% de sua área. O segundo, apesar de apresentar baixa capacidade, veio a sumir completamente somente no ano 2017.

Além dos eventos de baixa precipitação na sub-bacia ligada a estes reservatórios, há outros motivos que podem contribuir para estes cenários. Entre eles estão possivelmente a somatória de fatores como: localização em região de clima semiárido, tamanho da bacia, baixa cobertura vegetal, evaporação e geologia cristalina.

De acordo com o Plano Estadual de Recursos Hídricos do estado de Pernambuco (1998), a bacia do rio Brígida possui uma área de drenagem de, aproximadamente, 13.308,29 km² onde 9.403,10 km² são de tipo litológico cristalino, ou seja, aproximadamente 70% de toda a bacia.

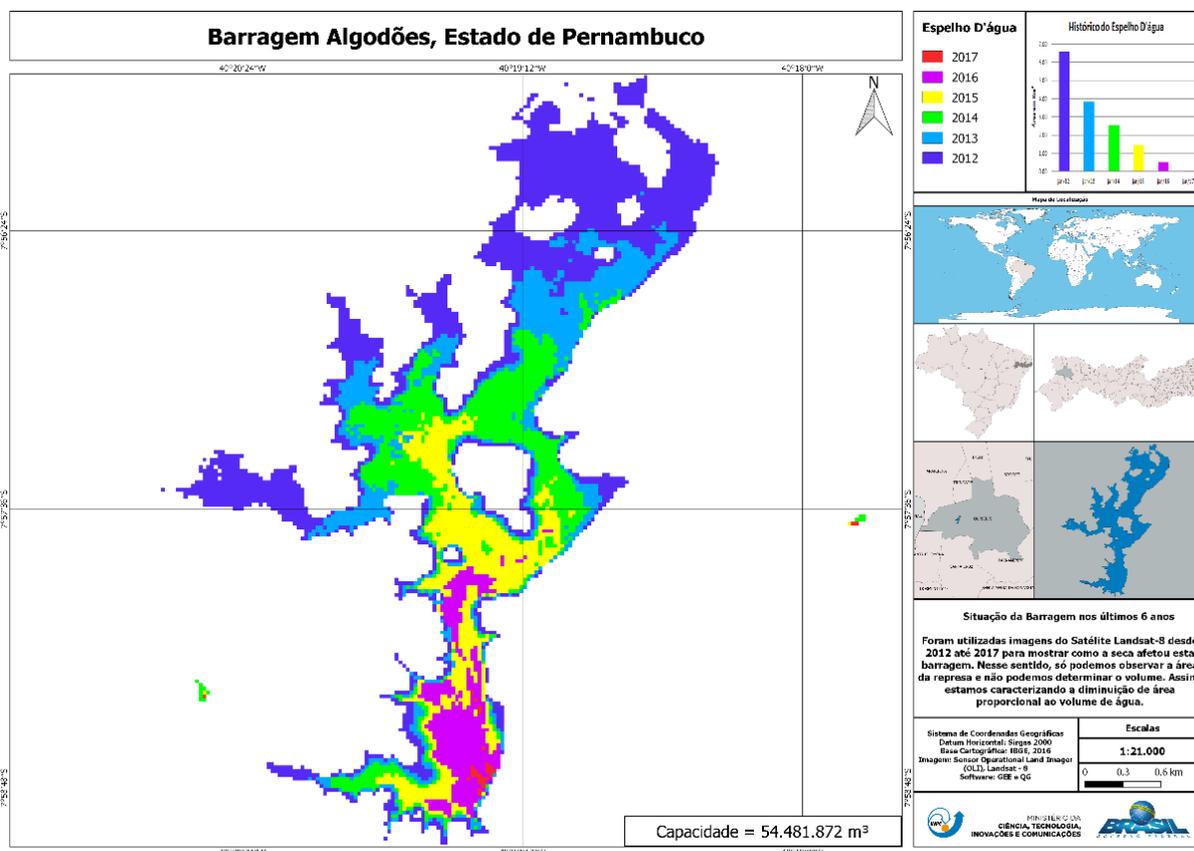
As áreas de geologia cristalina, muito comuns no Nordeste do Brasil, apresentam baixa porosidade e permeabilidade quando comparadas a regiões de geologia sedimentar, o que acaba dificultando o armazenamento de água subterrânea e formação de uma rede de rios perenes, principalmente em regiões de clima semiárido. Essas características fazem com que as águas superficiais sejam rapidamente levadas aos reservatórios, onde são perdidas, em grande parte, por evaporação direta, afetando a disponibilidade hídrica. Já na dinâmica em locais de estrutura geológica sedimentar, as águas das chuvas abastecem os solos e aquíferos, onde a liberação das águas para as reservas hídricas superficiais é feita paulatinamente, o que diminui a sua exposição à radiação solar e perda por evaporação.

Segundo a ANA (2017), a magnitude das elevadas taxas de evaporação induzidas pela temperatura, com totais anuais superiores a 2.000 mm, pode causar a diminuição da água de lagos, açudes e reservatórios, representando cerca de até 1/3 da vazão média afluyente sendo anualmente consumida pela exposição dos espelhos d'água.

Nessa conjuntura ambiental, a barragem Engenheiro Camacho retratou igualmente o cenário de perda total do espelho d'água, somente para o período de 2016, voltando a expandir sua área em 2017 (0,45 km²). Já as barragens de Algodões (Figura 5), Entremontes, Lagoa do Barro e Lopes II quase secaram

totalmente. Todas elas perderam área progressivamente a partir do ano de 2015 com a intensificação das secas que atingiram todo o semiárido nordestino.

Figura 5 - Dinâmica do espelho d'água do reservatório Algodões, Pernambuco.



Fonte - Autores (2021).

Outra importante bacia, localizada na microrregião pluviométrica Sertão, é a bacia do rio Pajeú. Nesta bacia que escoa para o rio São Francisco e ajuda na formação dos chamados rios interiores, foram analisados cinco reservatórios dos quais apenas o Rosário perdeu completamente seu espelho d'água a partir do ano de 2016 e assim se manteve no ano seguinte, como mostra a tabela 3. A barragem de Saco I quase secou completamente no ano de 2017, como resultado das sucessivas secas e intensificação desse processo ao longo dos anos anteriores.

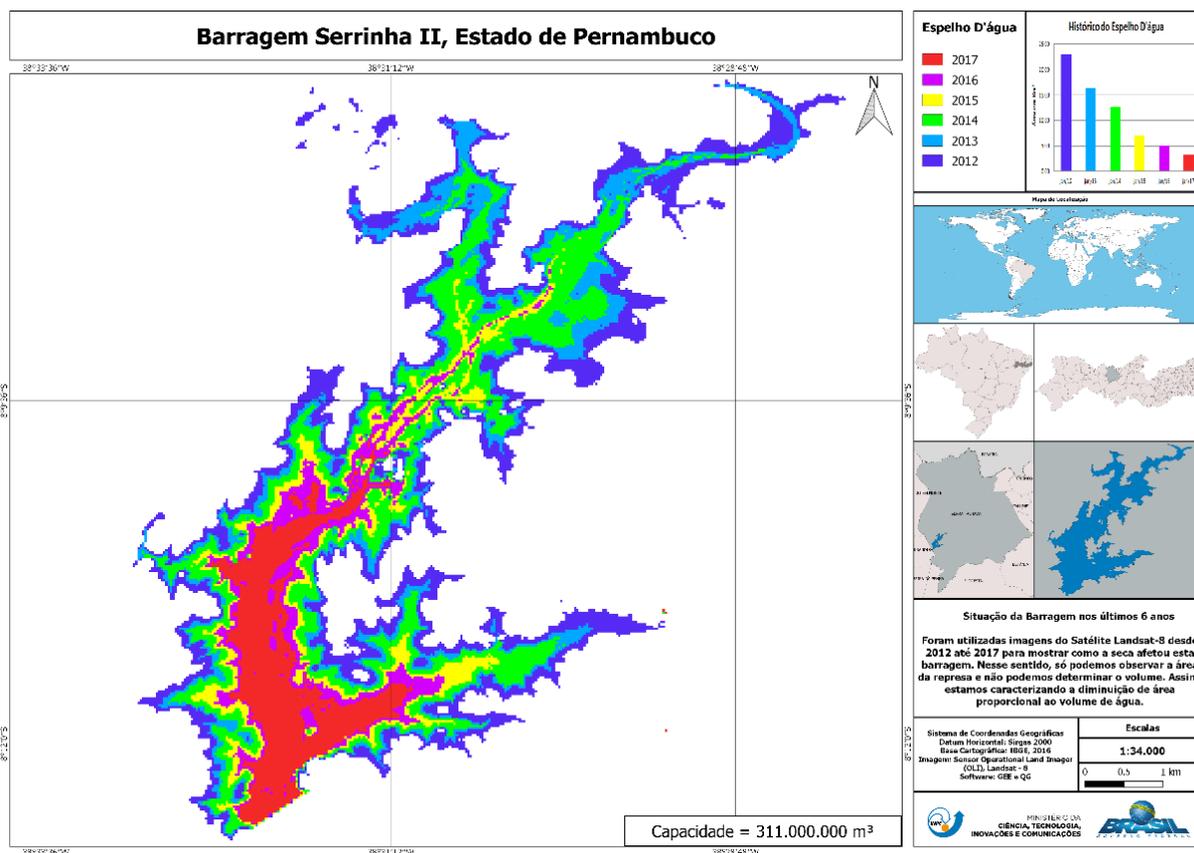
Tabela 3 - Variação temporal das áreas dos espelhos d'água dos reservatórios da bacia Pajeú.

Reservatórios	Capacidade (m³)	Área dos Espelhos D'Água (Km²)						Variação Percentual de Área: (+) Ganho e (-) Perda
		2012	2013	2014	2015	2016	2017	
Brotas	19.639.577	1,48	0,04	0,76	0,50	0,30	0,73	- 50,68
Cachoeira II	21.031.145	2,23	0,76	2,17	1,42	1,24	0,28	- 87,44
Rosário	34.990.000	3,52	2,05	1,53	0,25	0,00	0,00	- 100,00
Saco I	36.000.000	4,77	3,06	2,63	1,54	0,67	0,02	- 99,58
Serrinha II	311.000.000	22,91	16,37	12,69	7,05	5,05	3,18	- 86,12

Fonte - Autores (2021).

Na mesma bacia, o reservatório Serrinha II (Figura 6), maior reservatório desta bacia, embora possua capacidade para acumular uma grande quantidade de água, 311 milhões de m³, perdeu mais de 86% de sua área ao longo dos seis anos avaliados, sendo os três primeiros anos os de maior perda. Os demais reservatórios (Cachoeira II e Brotas) também apresentaram perdas significativas de área.

Figura 6 - Dinâmica do espelho d'água do reservatório Serrinha II, Pernambuco.



Fonte - Autores (2021).

Na bacia do rio Ipojuca, uma importante bacia da microrregião pluviométrica Agreste, foram analisadas as dinâmicas de perda de área dos espelhos d'água de três reservatórios, conforme pode ser observado na tabela 4. A bacia do rio Ipojuca escoa para o Oceano Atlântico e junto com outros rios constituem os chamados rios litorâneos.

Tabela 4 - Variação temporal das áreas dos espelhos d'água dos reservatórios da bacia Ipojuca.

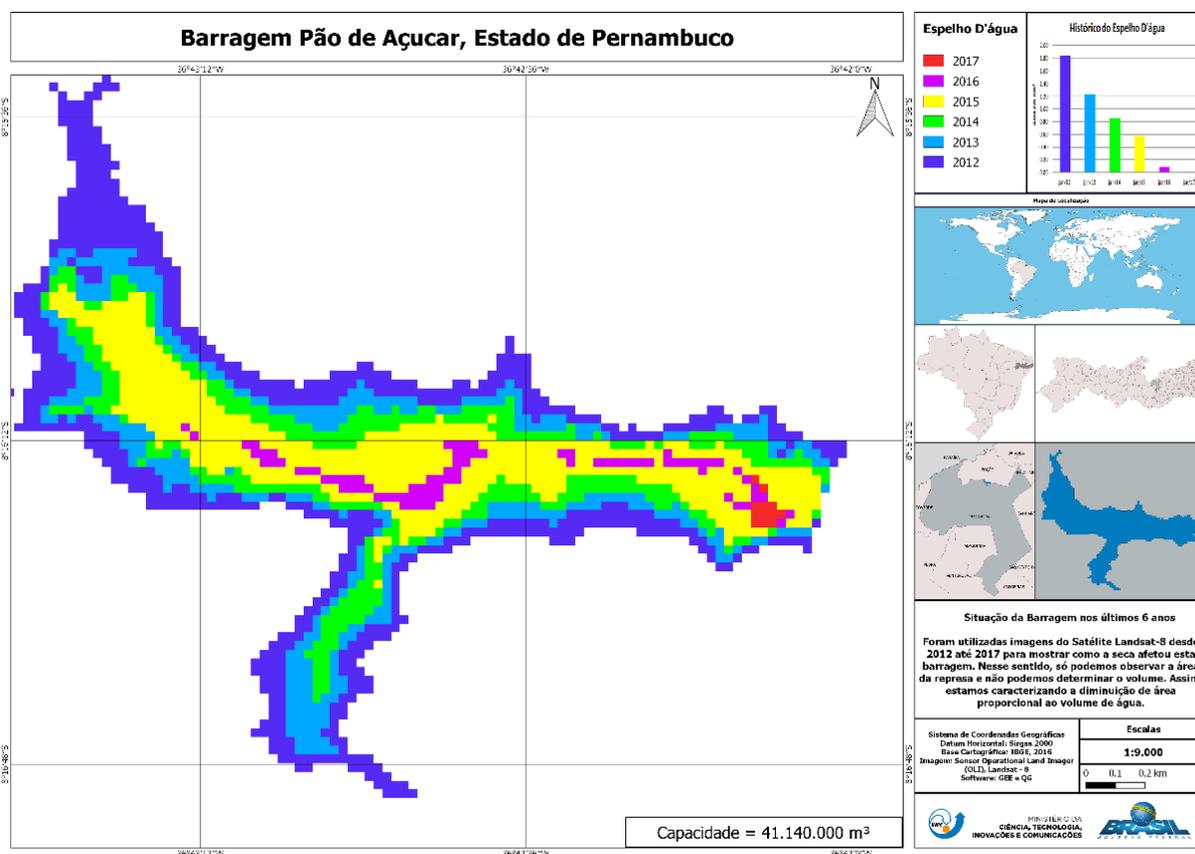
Reservatórios	Capacidade (m ³)	Área dos Espelhos D'Água (Km ²)						Variação Percentual de Área: (+) Ganho e (-) Perda
		2012	2013	2014	2015	2016	2017	
Belo Jardim	30.740.000	2,57	1,96	1,12	0,52	0,02	0,02	- 99,22
Engenheiro Severino Guerra	17.776.470	1,44	0,65	0,35	0,37	0,00	0,02	- 98,61
Pão de Açúcar	41.140.000	1,83	1,22	0,85	0,57	0,08	0,01	- 99,45

Fonte - Autores (2021).

A intensificação das sucessivas secas nos períodos de 2013 a 2017 agravaram ainda mais a conjuntura de redução de superfície de água das reservas hídricas da bacia Ipojuca. Assim, os reservatórios de Belo Jardim, Engenheiro Severino Guerra e Pão de Açúcar (Figura 7) apresentaram perdas significativas nas suas áreas, com valores que superaram mais de 98% de suas superfícies de água, conforme pode ser observado na tabela 4.

O reservatório Engenheiro Severino Guerra foi o único desta bacia que apresentou ausência do espelho d'água, fato ocorrido no ano de 2016. Um dos fatores que podem ter contribuído para esse quadro diz respeito a sua baixa capacidade em relação aos demais reservatórios desta bacia. Felizmente, já no ano seguinte (2017), conseguiu recuperar um pouco da sua área total que foi sendo perdida na medida em que se intensificou a seca.

Figura 7 - Dinâmica do espelho d'água do reservatório Pão de Açúcar, Pernambuco.



Fonte - Autores (2021).

No contexto geral, é necessário destacar que os reservatórios da unidade de planejamento da bacia Rios Litorâneos 2 (Tabela 5) apresentaram baixo percentual de perda, quando comparados às outras bacias, com valores inferiores a 34% (Duas Unas e Tapacurá). Ademais, a bacia está totalmente inserida em uma microrregião pluviométrica de clima mais úmido (Microrregião Pluviométrica Mata/Litoral). Além disso, cabe ressaltar que somente o reservatório de Pirapama apresentou aumento de seu espelho d'água, fato ocorrido já no ano de 2014 em relação ao de 2012. Esse comportamento pode estar ligado a eventos de chuvas concentradas nas sub-bacias ligadas a esse reservatório.

Tabela 5 - Variação temporal das áreas dos espelhos d'água dos reservatórios bacia Rios Litorâneos 2.

Reservatórios	Capacidade (m ³)	Área dos Espelhos D'Água (Km ²)						Variação Percentual de Área: (+) Ganho e (-) Perda
		2012	2013	2014	2015	2016	2017	
Duas Unas	23.548.000	1,66	1,66	1,47	1,52	1,66	1,27	- 23,49
Pirapama	60.880.000	3,94	2,81	4,04	4,41	4,58	4,24	+ 7,61
Tapacurá	94.200.000	6,58	3,62	5,02	4,96	5,28	4,37	- 33,59

Fonte - Autores (2021).

Outros reservatórios que apresentaram baixo percentual de perda de área foram Bálsamo e Cajueiro, ambos com valores inferiores a 30% (Tabela 6). Localizados na bacia Mundaú (Pequenos Rios Interiores), sub-bacia do rio São Francisco, estes reservatórios estão inseridos em uma microrregião pluviométrica de clima úmido (Agreste Meridional/Brejo). Assim, além do clima, ficam a cargo de fatores geoambientais já mencionados anteriormente como, por exemplo, tamanho da bacia, cobertura vegetal, evaporação, embasamento geológico etc., a possível explicação para a baixa variação de área.

Ao analisarmos todos os elementos que integram os meios físico e biológico de uma bacia hidrográfica sob a perspectiva sistêmica, onde existe uma grande relação de interdependência entre os componentes ambientais por meio de fluxos de matéria e energia, nos permite uma melhor compreensão sobre como essas características influenciam no comportamento das reservas hídricas superficiais. Além destes fatores, as operações de controle de vazão pela abertura ou fechamento das comportas dos reservatórios, utilizadas para gestão das águas das bacias hidrográficas, podem interferir de forma considerável na dinâmica dos espelhos d'água, ou seja, nas variações das áreas inundadas.

Tabela 6 - Variação temporal das áreas dos espelhos d'água dos reservatórios da bacia Mundaú.

Reservatórios	Capacidade (m ³)	Área dos Espelhos D'Água (Km ²)						Variação Percentual de Área: (+) Ganho e (-) Perda
		2012	2013	2014	2015	2016	2017	
Bálsamo	18.850.000	0,77	0,90	0,45	0,78	0,70	0,63	- 18,18
Cajueiro	14.500.000	1,38	1,00	1,13	1,12	1,12	1,00	- 27,54

Fonte - Autores (2021).

A bacia do rio Garças, outra importante sub-bacia do rio São Francisco, está localizada na porção oeste do Estado e na microrregião pluviométrica do Alto Sertão. Nesta bacia foi mapeado apenas o reservatório de Saco II. Apesar de estar totalmente inserida em uma região de clima semiárido, o reservatório apresentou aumento expressivo de seu espelho d'água, fato ocorrido já no ano de 2014 em relação a todo o período anterior e posterior, conforme mostra a tabela 7. Este reservatório obteve um aumento de 94% de sua área em relação ao ano base de 2012. Este quadro de crescimento pode estar associado a chuvas concentradas na sub-bacia deste reservatório.

Tabela 7 - Variação temporal das áreas dos espelhos d'água dos reservatórios da bacia Garças.

Reservatórios	Capacidade (m ³)	Área dos Espelhos D'Água (Km ²)						Variação Percentual de Área: (+) Ganho e (-) Perda
		2012	2013	2014	2015	2016	2017	
Saco II	123.523.510	0,55	0,07	3,82	3,62	3,24	1,07	+ 94,55

Fonte - Autores (2021).

Ainda na microrregião pluviométrica do Alto Sertão pernambucano, na bacia Terra Nova, foram mapeados os espelhos d'água de dois reservatórios, Abóboras e Boa Vista. Esses reservatórios também apresentaram grande dificuldade para manter seus espelhos d'água ao longo do período analisado, sendo que a barragem de Abóboras secou completamente já no ano de 2014 e assim se manteve até 2017, enquanto Boa Vista perdeu mais de 96% de área (Tabela 8).

Tabela 8 - Variação temporal das áreas dos espelhos d'água dos reservatórios da bacia Terra Nova.

Reservatórios	Capacidade (m ³)	Área dos Espelhos D'Água (Km ²)						Variação Percentual de Área: (+) Ganho e (-) Perda
		2012	2013	2014	2015	2016	2017	
Abóboras	14.360.000	0,47	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	- 100,00
Boa Vista	16.448.450	0,93	0,55	0,36	0,23	0,11	0,03	- 96,77

Fonte - Autores (2021).

Considerando a dinâmica de perda de área e dificuldade para manter os espelhos d'água que foi observado nos reservatórios da bacia Terra Nova, a bacia Moxotó também revelou um comportamento semelhante, apresentando reduções superiores a 90%, conforme pode ser observado na tabela 9. As duas bacias escoam para o rio São Francisco e formam os chamados rios interiores.

Tabela 9 - Variação temporal das áreas dos espelhos d'água dos reservatórios da bacia Moxotó.

Reservatórios	Capacidade (m ³)	Área dos Espelhos D'Água (Km ²)						Variação Percentual de Área: (+) Ganho e (-) Perda
		2012	2013	2014	2015	2016	2017	
Custódia	21.623.100	1,52	0,66	0,00	0,00	0,00	0,13	- 91,45
Engenheiro Francisco Sabóia	504.000.000	22,13	10,99	6,95	4,03	2,97	1,85	- 91,64

Fonte - Autores (2021).

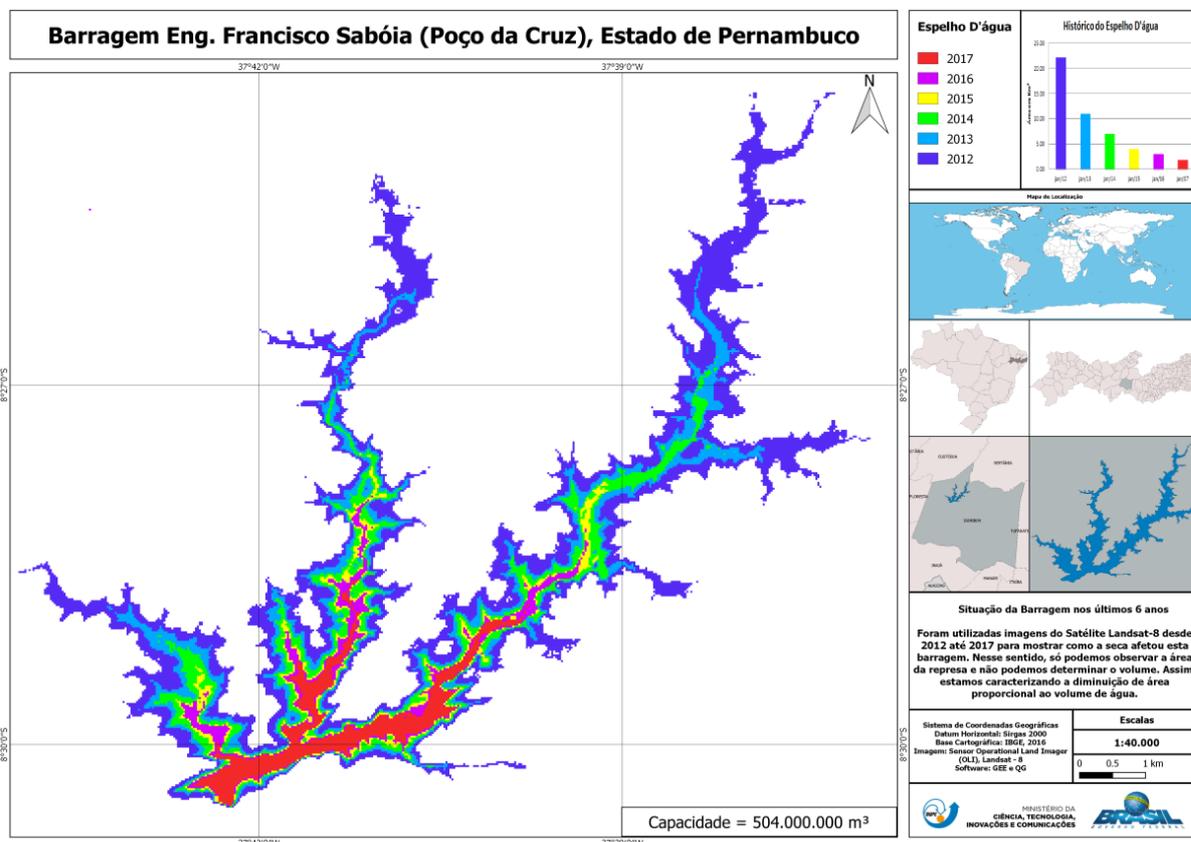
A barragem de Custódia apresentou reduções gradativas de seu espelho d'água e chegou a secar completamente em 2014, e assim se manteve até 2016. Somente a partir de 2017 veio a exibir uma superfície de água mapeável pelo sensor do satélite. Já a barragem de Engenheiro Francisco Sabóia (Figura 8), apesar de possuir uma capacidade hídrica superior a 504 milhões de m³, apresentou dificuldade para manter seu espelho d'água ao longo do período analisado e perdeu mais de 91% de área, porém sem secar em nenhum dos anos mapeados.

Tabela 10 - Variação temporal das áreas dos espelhos d'água dos reservatórios da bacia Ipanema.

Reservatórios	Capacidade (m ³)	Área dos Espelhos D'Água (Km ²)						Variação Percentual de Área: (+) Ganho e (-) Perda
		2012	2013	2014	2015	2016	2017	
Arcoverde	16.800.000	0,85	0,24	0,04	0,00	0,00	0,02	- 97,65

Fonte - Autores (2021).

Figura 8 - Dinâmica do espelho d'água do reservatório Engenheiro Francisco Sabóia, Pernambuco.



Fonte - Autores (2021).

Localizada em uma região de clima semiárido (microrregião pluviométrica do Sertão do Moxotó), no alto curso do rio Ipanema, a barragem de Arcoverde apresentou ausência do espelho d'água a partir do período de 2015, e assim se manteve no ano seguinte (Tabela 10). Somente a partir de 2017 veio a exibir uma superfície de água mapeável.

As áreas das bacias mais próximas ao litoral e de clima mais úmido, como as bacias Una e Rios Litorâneos 1, os reservatórios conseguiram manter o espelho d'água ao longo do período analisado. A barragem do Prata, localizada na microrregião pluviométrica Agreste Meridional/Brejo, perdeu pouco mais de 45% de área, conforme pode ser visualizado na tabela 11.

Tabela 11 - Variação temporal das áreas dos espelhos d'água dos reservatórios da bacia Una.

Reservatórios	Capacidade (m³)	Área dos Espelhos D'Água (Km²)						Variação Percentual de Área: (+) Ganho e (-) Perda
		2012	2013	2014	2015	2016	2017	
Prata	42.147.000	2,42	0,76	1,95	2,41	2,54	1,32	- 45,45

Fonte - Autores (2021).

Ainda com relação à dinâmica de manutenção dos espelhos d'água, o reservatório de Botafogo, inserido na microrregião pluviométrica Mata/Litoral, perdeu em média mais de 51% de sua área, mesmo tendo uma baixa capacidade hídrica (tabela 12).

Tabela 12 - Variação temporal das áreas dos espelhos d'água dos reservatórios bacia Rios Litorâneos 1.

Reservatórios	Capacidade (m ³)	Área dos Espelhos D'Água (Km ²)						Variação Percentual de Área: (+) Ganho e (-) Perda
		2012	2013	2014	2015	2016	2017	
Botafogo	28.800.000	1,26	1,08	0,81	0,66	0,86	0,61	- 51,59

Fonte - Autores (2021).

A tendência de manutenção da água superficial e pouca perda de área também foi observada para todos os reservatórios da bacias Goiana, como mostra a tabela 13. O reservatório de Siriji foi o menos afetado, perdendo pouco mais de 5%. Já Guararema conseguiu resistir aos sucessivos anos de seca e apresentou uma redução de aproximadamente 40%.

Tabela 13 - Variação temporal das áreas dos espelhos d'água dos reservatórios da bacia Goiana.

Reservatórios	Capacidade (m ³)	Área dos Espelhos D'Água (Km ²)						Variação Percentual de Área: (+) Ganho e (-) Perda
		2012	2013	2014	2015	2016	2017	
Guararema	18.000.000	1,96	1,74	1,48	1,70	1,68	1,16	- 40,82
Siriji	17.260.000	1,01	0,77	0,33	0,54	0,78	0,95	- 5,94

Fonte - Autores (2021).

A dinâmica de expansão e redução dos espelhos d'água foi relacionada neste estudo como uma consequência direta aos eventos de precipitações, sejam elas acima ou abaixo da média. Contudo, outros elementos do clima (evapotranspiração, temperatura, insolação etc.) e fatores do clima (maritimidade, altitude etc.), assim como as características geológicas, pedológicas, hidrológicas, cobertura vegetal, uso do solo, tamanho das áreas de drenagem de cada bacia e formas múltiplas de usos, também podem ter contribuído diretamente para os cenários apresentados.

Além disso, medidas operacionais de controle de vazão para geração de energia elétrica, ações preventivas para garantir a segurança das barragens, restrições de uso, racionamentos ou até mesmo transposição de águas (PEREIRA; SILVA JÚNIOR; BARBOSA, 2019) produzem efeitos diretos sobre as reservas hídricas superficiais.

No contexto geral, as informações de ausência de espelho d'água verificadas neste estudo corroboram com os dados de falta d'água e dos níveis críticos de volume dos reservatórios de Pernambuco, disponibilizadas pelo Sistema de Acompanhamento de Reservatórios (SAR) da ANA. O SAR consiste em uma plataforma que permite o acompanhamento da operação dos principais reservatórios do Brasil, onde são monitorados mais de 500 reservatórios nos nove estados da Região Nordeste e em Minas Gerais (ANA, 2021). Assim, esses reservatórios secaram completamente durante o período de análise e/ou apresentaram área inferior à resolução espacial utilizada, 30 metros.

Da mesma maneira, pesquisas recentes que utilizaram técnicas de Sensoriamento Remoto para analisar a dinâmica dos espelhos d'água nos principais reservatórios da Paraíba (BARBOSA et al., 2019a), Rio Grande do Norte (BARBOSA et al., 2019b) e Ceará (BARBOSA et al., 2021) também apontaram a redução significativa das superfícies de água entre os anos de 2012 e 2017, ou seja, o baixo nível dos reservatórios daqueles Estados nesse mesmo período.

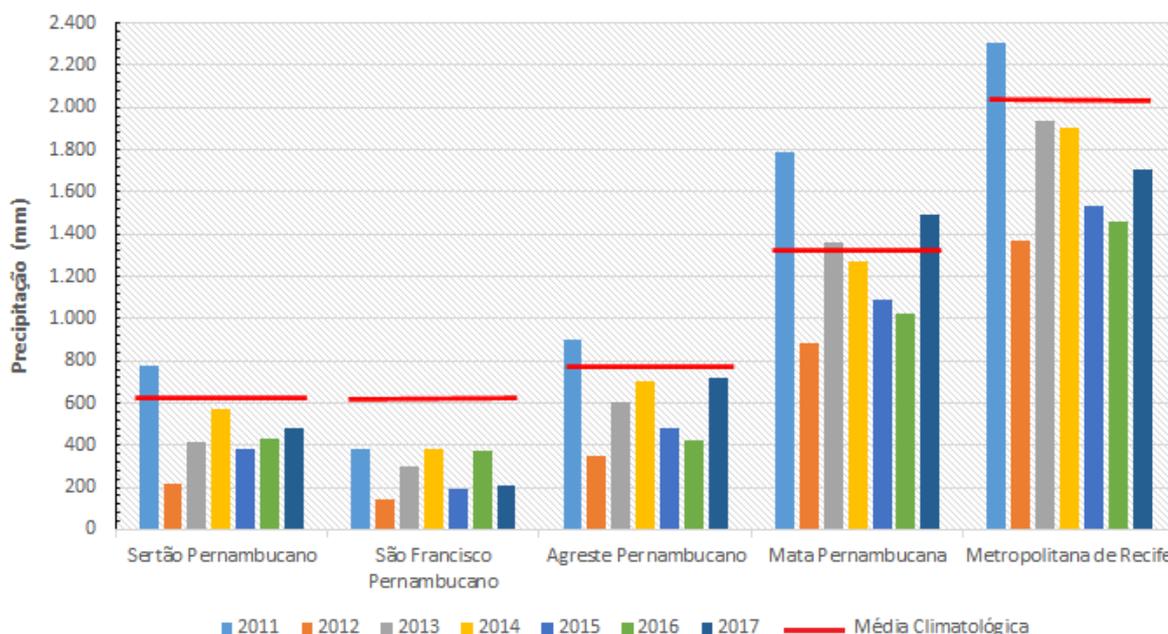
As informações do gráfico de precipitação da média anual das mesorregiões de Pernambuco para o período de 2011 a 2017 (Figura 9) auxiliam no entendimento da dinâmica dos espelhos d'água dos reservatórios, tendo em vista que as variações das precipitações os afetam diretamente. Nele é possível perceber uma redução significativa dos valores de precipitação pluviométrica no ano de 2012, quando comparado aos valores de precipitação do ano anterior, 2011. Nos cinco anos seguintes, apesar de apresentar aumentos nos valores médios em relação a 2012, as precipitações não foram o suficiente para

a recuperação de alguns reservatórios, principalmente os localizados nas regiões do sertão e agreste pernambucano.

Valores muito abaixo da média em um ano, como ocorreu no ano de 2012 em todas as mesorregiões, podem afetar diretamente o desempenho dos reservatórios para os anos seguintes, mesmo que as precipitações apresentem valores próximos da média climatológica, como ocorreu em 2014. A Região Metropolitana do Recife (RMR), que possui uma média climatológica de 2.039,6 mm (APAC, 2017), apresentou valores inferiores a 1.400 mm no ano de 2012, ficando aproximadamente 30% abaixo da média; percentual semelhante ao da mesorregião Mata Pernambucana, que possui uma média de 1.321 mm e choveu algo em torno de 900 mm (ano de 2012).

Nas mesorregiões de clima menos úmido (Agreste) e semiárido (Sertão e São Francisco) os percentuais abaixo da normalidade foram ainda maiores. Na região agreste, o valor total para o ano de 2012 foi de, aproximadamente, 350 mm, ficando 55% abaixo da média, que é de 768,6 mm (APAC, 2017). Já as mesorregiões de clima semiárido (Sertão e São Francisco), as chuvas de 2012 foram em média 70% abaixo do esperado, com 200 mm no Sertão de Pernambuco e 150 em São Francisco, onde a média climatológica para essas regiões é de, aproximadamente, 624 mm.

Figura 9 - Precipitação total e média anual das mesorregiões de Pernambuco para o período de 2011 a 2017.



Fonte - adaptado da APAC, 2021.

Ao estudar a influência da variabilidade climática na precipitação acumulada e nos volumes de água dos reservatórios no Nordeste do Brasil no período de 1986 a 2018, Gomes e Lima (2021) observaram que a restauração dos volumes dos reservatórios é lenta e depende de uma sequência de estações chuvosas de média ou acima da média de boa qualidade.

Os resultados ainda sugerem que os reservatórios localizados nas microrregiões pluviométricas mais úmidas das bacias do Leste (Rios Litorâneos 1, Rios Litorâneos 2, Coreaú, Goiana, Una, Mundaú e Capibaribe) apresentaram menor perda de área inundada em comparação com os reservatórios das bacias das regiões Centrais e Oeste (Brígida, Terra Nova, Moxotó, Ipanema, Ipojuca e Pajeú), de domínio climático mais seco (microrregiões pluviométricas Sertão).

A diferença observada entre os reservatórios das microrregiões climáticas úmidas e semiáridas, e de sua relação com a dinâmica dos espelhos d'água dos reservatórios, corrobora com as observações feitas por

Medeiros et al. (2021), ao estudar as condições hidrometeorológicas do semiárido e litoral leste do Nordeste do Brasil no período 2012-2017. Neste trabalho, o autor observou que os reservatórios da região costeira oriental do Nordeste do Brasil (ENEB), apesar da precipitação predominantemente negativa em comparação com os dados climatológicos, não foram suficientes para culminar em seca hidrológica, ao contrário dos reservatórios do semiárido que, devido à persistência e severidade das anomalias negativas da precipitação, apresentaram uma queda constante do volume armazenado até atingirem situação crítica (MEDEIROS et al., 2021).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise da dinâmica espaço-temporal por meio de técnicas de Sensoriamento Remoto mostrou-se relevante para a compreensão de como os reservatórios estão respondendo aos eventos de precipitações abaixo da média. As mudanças apontadas na dinâmica das águas superficiais, tanto a nível de reservatórios como a nível de bacias em contextos geograficamente distintos, mostraram como as águas dos reservatórios foram afetadas durante os últimos seis anos de seca, que compreendeu o período de 2012 a 2017.

No geral, este trabalho apontou que os reservatórios localizados nas bacias de clima mais úmido apresentaram menor perda de área em comparação com as de clima mais seco. Nessa perspectiva, a seca prolongada reduziu o volume de água superficial disponível, de modo que os 38 reservatórios estudados tiveram redução de sua área em algum momento do período analisado. Desse montante, 10 reservatórios apresentaram redução progressiva ao longo do tempo, mas mantiveram o espelho d'água (Algodões, Arcoverde, Belo Jardim, Boa Vista, Custódia, Engenheiro Francisco Sabóia, Lagoa do Barro, Pão de Açúcar, Saco I e Serrinha II); e oito reservatórios chegaram ao desaparecimento total da sua lâmina d'água e secaram completamente (Abóboras, Cachimbo, Chapéu, Engenheiro Gercino Pontes, Jucazinho, Machado, Poço Fundo e Rosário).

Em virtude do número elevado de reservatórios existentes em Pernambuco, a utilização de imagens de satélite é uma excelente ferramenta para a observação, mapeamento e análise dos corpos d'água, assim como para mensurar os efeitos da seca prolongada nos principais reservatórios que abastecem milhões de pessoas, fazem o controle de enchentes, perenizam trechos de rios intermitentes, armazenam água para a produção de energia hidrelétrica e fomentam a economia e agricultura irrigada.

Os resultados deste trabalho podem ter diversos usos potenciais nas políticas e planejamento de abastecimento, auxiliando na tomada de decisão, gerenciamento das águas e no uso sustentável. Tais informações são extremamente importantes para o planejamento e a gestão ambiental dos recursos hídricos, sob a perspectiva de fomentar políticas de abastecimento e, com isso, ampliar a capacidade de enfrentar problemas relacionados à segurança hídrica.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa do Programa de Capacitação Institucional (PCI), assim como ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) da Coordenação Espacial do Nordeste (COENE) pelo fomento à pesquisa. Ademais, dedicamos esse trabalho ao pesquisador Miguel Dragomir Zanic Cuellar (in memoriam), pelas suas valiosas contribuições.

REFERÊNCIAS

ANA - Agência Nacional de Águas. **Sistema de Acompanhamento de Reservatórios**. 2021. Disponível em: <https://www.ana.gov.br/sar/>. Acesso em: 26 de abril de 2021.

_____. **Reservatórios do semiárido brasileiro**: hidrologia, balanço hídrico e operação: relatório síntese. Brasília: ANA, 2017. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br>. Acesso em: 17 de julho de 2021.

APAC - Agência Pernambucana de Águas e Clima. **Portal do Monitoramento Pluviométrico**. 2021. Disponível em: <http://www.sirh.srh.pe.gov.br/apac/meteorologia/>. Acesso em: 20 de março de 2021.

_____. **Boletim do Clima Síntese Climática**. 2017. Disponível em: <https://www.apac.pe.gov.br/>. Acesso em: 11 de julho de 2021.

_____. **Relatório de situação de recursos hídricos do Estado de Pernambuco 2011/2012**. 2013. Disponível em: <https://www.lai.pe.gov.br/apac/wpcontent/uploads/sites/9/2019/03/Relat%C3%B3rio-de-situa%C3%A7%C3%A3o-de-recursos-h%C3%ADricos-do-Estado-de-Pernambuco-APAC-2011-2012.pdf>. Acesso em: 13 de julho de 2021.

BARBOSA, A. H. S.; CUELLAR, M. D. Z.; MOREIRA, M. M.; ARRAES, K. A.; SILVA, C. S. P. Mapeamento e Análise dos Espelhos D'água dos Principais Reservatórios da Paraíba por meio de Sensoriamento Remoto. In: XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS. Foz do Iguaçu. **Anais**. 2019a. Disponível: <https://eventos.abrh.org.br/xxiiisbrh/>. Acesso: 20 de março de 2021.

BARBOSA, A. H. S.; CUELLAR, M. D. Z.; ARRAES, K. A.; MOREIRA, M. M. Sensoriamento remoto aplicado à análise dos espelhos d'água dos principais reservatórios do Rio Grande do Norte. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 19. (SBSR), 2019, Santos. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2019b. p. 867-870. Internet. ISBN 978-85-17-00097-3. Disponível: <http://marte2.sid.inpe.br/rep/sid.inpe.br/marte2/2019/11.08.12.52/capa.htm>. Acesso: 20 de março de 2021.

BARBOSA, A. H. S.; CUELLAR, M. D. Z.; MOREIRA, M. M.; ARRAES, K. A.; SILVA, C. S. P. 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, julho/agosto. No prelo. <https://doi.org/10.26848/rbqf.v14.4.p2220-2241>

BARBOSA, C. C. F.; NOVO, E. M. L.; MARTINS, V. S. **Introdução ao Sensoriamento Remoto de Sistemas Aquáticos**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2019. Disponível: <http://www.dpi.inpe.br/labisa/livro/res/conteudo.pdf>. Acesso: 20 de março de 2021.

CHEN, Y.; FAN, R.; YANG, X.; WANG, J.; LATIF, A. Extraction of Urban Water Bodies from High-Resolution Remote-Sensing Imagery Using Deep Learning. **Water**, [S.L.], v. 10, n. 5, p. 585, 2018. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/w10050585>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4441/10/5/585>. Acesso em: 27 de abril de 2021. <https://doi.org/10.3390/w10050585>

CPRM - Serviço Geológico do Brasil. **Mapas de Geodiversidade Estaduais**. 2010. Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/14707>. Acesso em: 20 de julho de 2021.

COOLEY, S.; SMITH, L.; STEPAN, L.; MASCARO, J. Tracking Dynamic Northern Surface Water Changes with High-Frequency Planet CubeSat Imagery. **Remote Sensing**, [S.L.], v. 9, n. 12, p. 1306, 2017. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/rs9121306>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-4292/9/12/1306>. Acesso em: 12 de março de 2021. <https://doi.org/10.3390/rs9121306>

CUNHA, A. P. M. A.; ZERI, M.; LEAL, K. D.; COSTA, L.; CUARTAS, L. A.; MARENGO, J. A.; TOMASELLA, J.; VIEIRA, R. M.; BARBOSA, A. A.; CUNNINGHAM, C.; GARCIA, J. V. C.; BROEDEL, E.; ALVALÁ, R.; RIBEIRO-NETO, G. Extreme Drought Events over Brazil from 2011 to 2019. **Atmosphere**, [S.L.], v. 10, n. 11, p. 642, 2019. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/atmos10110642>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4433/10/11/642>. Acesso em: 28 de abril de 2021. <https://doi.org/10.3390/atmos10110642>

DU, Y.; ZHANG, Y.; LING, F.; WANG, Q.; LI, W.; LI, X. Water Bodies' Mapping from Sentinel-2 Imagery with Modified Normalized Difference Water Index at 10-m Spatial Resolution Produced by Sharpening the SWIR Band. **Remote Sensing**, [S.L.], v. 8, n. 4, p. 354, 2016. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/rs8040354>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-4292/8/4/354>. Acesso em: 20 de março de 2021.

DUAN, Z.; BASTIAANSEN, W. G. M. Estimating water volume variations in lakes and reservoirs from four operational satellite altimetry databases and satellite imagery data. **Remote Sensing of Environment**, [S.L.], v. 134, p. 403-416, 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2013.03.010>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0034425713000898>. Acesso em: 27 de março de 2021.

ELSAHABI, M.; NEGM, A.; TAHAN, A. H. M. H. E. Performances Evaluation of Surface Water Areas Extraction Techniques Using Landsat ETM+ Data: case study aswan high dam lake (ahdl). **Procedia Technology**, [S.L.], v. 22, p. 1205-1212, 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.protcy.2016.02.001>.

Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212017316001778>. Acesso em: 18 de fevereiro de 2021. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2016.02.001>

FLORENZANO, T.G. **Iniciação em Sensoriamento Remoto**. Oficina de Textos São Paulo - SP, 123 p. 2011.

GOMES, R.S.; LIMA, K.C. Influence of the modes of climate variability in the Tropical Pacific and Atlantic on accumulated rainfall and reservoir water volumes in the Northeast Brazil. **International Journal of Climatology**, [S.L.], p. 425-437, 2021. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/joc.7132>. Disponível em: <https://rmts.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/joc.7132>. Acesso em: 27 de abril de 2021.

HUANG, C.; CHEN, Y.; ZHANG, S.; LI, L.; SHI, K.; LIU, R. Surface Water Mapping from Suomi NPP-VIIRS Imagery at 30 m Resolution via Blending with Landsat Data. **Remote Sensing**, [S.L.], v. 8, n. 8, p. 631, 29, 2016. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/rs8080631>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-4292/8/8/631>. Acesso em: 15 de janeiro de 2021.

KO, B.; KIM, H.; NAM, J. Classification of Potential Water Bodies Using Landsat 8 OLI and a Combination of Two Boosted Random Forest Classifiers. **Sensors**, [S.L.], v. 15, n. 6, p. 13763-13777, 2015. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/s150613763>. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4507615/>. Acesso em: 3 de fevereiro de 2021.

MEDEIROS, F. J.; OLIVEIRA, C. P.; GOMES, R. S.; SILVA, M. L.; CABRAL JÚNIOR, J. B. Hydrometeorological conditions in the semiarid and east coast regions of Northeast Brazil in the 2012-2017 period. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, [S.L.], v. 93, n. 1, p. 1-15, 2021. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0001-3765202120200198>. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0001-37652021000101213&tlng=en. Acesso em: 27 de abril de 2021.

MISHRA, K.; PRASAD, P. R. C. Automatic Extraction of Water Bodies from Landsat Imagery Using Perceptron Model. **Journal Of Computational Environmental Sciences**, [S.L.], v. 2015, p. 1-9, 2015. Hindawi Limited. <http://dx.doi.org/10.1155/2015/903465>. Disponível em: <https://www.hindawi.com/journals/jces/2015/903465/>. Acesso em: 18 de março de 2021. <https://doi.org/10.1155/2015/903465>

MOREIRA, M. M. Mapeamento Geotécnico e Reconhecimento dos Recursos Hídricos e do Saneamento da Área Urbana do Município de Natal-RN: Subsídios para o Plano Diretor. **Tese** (Doutorado em Geotecnica), Universidade de Brasília, Brasília, DF. 282 p. 2002.

MOREIRA, M. M.; SOUZA, N. M.; CUELLAR, M. D. Z.; ARRAES, K. A. Caracterização geológico-geotécnica e piezometria do aquífero semi-confinado barreiras do município de Natal – RN. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 20. ENCONTRO NACIONAL DE PERFURADORES DE POÇOS, 21. Campinas, SP. **Anais...** 2018. Disponível em: <http://urlib.net/rep/8JMKD3MGP3W34R/3SCGRG8>. Acesso em: 27 de abril de 2021.

MUELLER, N.; LEWIS, A.; ROBERTS, D.; RING, S.; MELROSE, R.; SIXSMITH, J.; LYMBURNER, L.; MCINTYRE, A.; TAN, P.; CURNOW, S.; IP, A. Water observations from space: mapping surface water from 25 years of landsat imagery across australia. **Remote Sensing of Environment**, [S.L.], v. 174, p. 341-352, 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2015.11.003>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425715301929>. Acesso em: 28 de março de 2021.

PEKEL, J. F.; COTTAM, A.; GORELICK, N.; BELWARD, A. S. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. **Nature**, [S.L.], v. 540, n. 7633, p. 418-422, 7 dez. 2016. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1038/nature20584>. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1038/nature20584>. Acesso: 6 de abril de 2021.

PEREIRA, G. R.; SILVA JÚNIOR, M. M.; BARBOSA, A. H. S. Mapeamento dos espelhos d'água de reservatórios da Paraíba: estudo de caso da transposição do Rio São Francisco. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 19. (SBSR), 2019, Santos. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2019. p. 927-930. Internet. ISBN 978-85-17-00097-3. Disponível em: <http://marte2.sid.inpe.br/rep/sid.inpe.br/marte2/2019/11.08.12.52/capa.htm>. Acesso: 20 de março de 2021.

PERHPE - **Plano Estadual de Recursos Hídricos de Pernambuco**. Secretaria de Recursos Hídricos - PE Recife, 215p. 1998.

- PHAM-DUC, B.; PRIGENT, C.; AIRES, F. Surface Water Monitoring within Cambodia and the Vietnamese Mekong Delta over a Year, with Sentinel-1 SAR Observations. **Water**, [S.L.], v. 9, n. 6, p. 366, 2017. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/w9060366>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4441/9/6/366>. Acesso em: 2 de abril de 2021. <https://doi.org/10.3390/w9060366>
- PICKENS, A. H.; HANSEN, M. C.; HANCHER, M.; STEHMAN, S. V.; TYUKAVINA, A.; POTAPOV, P.; MARROQUIN, B.; SHERANI, Z. Mapping and sampling to characterize global inland water dynamics from 1999 to 2018 with full Landsat time-series. **Remote Sensing of Environment**, [S.L.], v. 243, p. 111792, 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2020.111792>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425720301620>. Acesso em: 13 de abril de 2021.
- POSTEL, S. L.; DAILY, G. C.; EHRlich, P. R. Human Appropriation of Renewable Fresh Water. **Science**, [S.L.], v. 271, n. 5250, p. 785-788, 1996. American Association for the Advancement of Science (AAAS). <http://dx.doi.org/10.1126/science.271.5250.785>. Disponível em: <https://science.sciencemag.org/content/271/5250/785/tab-article-info>. Acesso em: 26 de maio de 2021. <https://doi.org/10.1126/science.271.5250.785>
- SARP, G.; OZCELIK, M. Water body extraction and change detection using time series: a case study of lake burdur, turkey. **Journal Of Taibah University for Science**, [S.L.], v. 11, n. 3, p. 381-391, 2017. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jtusci.2016.04.005>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1658365516300206>. Acesso em: 26 de maio de 2021.
- SOUZA, C.; KIRCHHOFF, F.; OLIVEIRA, B.; RIBEIRO, J.; SALES, M. Long-Term Annual Surface Water Change in the Brazilian Amazon Biome: potential links with deforestation, infrastructure development and climate change. **Water**, [S.L.], v. 11, n. 3, p. 566, 2019. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/w11030566>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4441/11/3/566>. Acesso em: 20 de março de 2021. <https://doi.org/10.3390/w11030566>
- TULBURE, M. G.; BROICH, M. Spatiotemporal dynamic of surface water bodies using Landsat time-series data from 1999 to 2011. **Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, [S.L.], v. 79, p. 44-52, 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.isprs.2013.01.010>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0924271613000300>. Acesso em: 31 de março de 2021.
- TULBURE, M. G.; BROICH, M. Spatiotemporal patterns and effects of climate and land use on surface water extent dynamics in a dryland region with three decades of Landsat satellite data. **Science of the Total Environment**, [S.L.], v. 658, p. 1574-1585, 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.390>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969718347466>. Acesso em: 31 de março de 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.390>
- XU, H.; XU, G.; WEN, X.; HU, X.; WANG, Y. Lockdown effects on total suspended solids concentrations in the Lower Min River (China) during COVID-19 using time-series remote sensing images. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, [S.L.], v. 98, p. 102301, jun. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jag.2021.102301>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0303243421000088?via%3Dihub>. Acesso em: 31 de maio de 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102301>
- YAN, W.; SHAKER, A.; LAROCQUE, P. Scan Line Intensity-Elevation Ratio (SLIER): an airborne lidar ratio index for automatic water surface mapping. **Remote Sensing**, [S.L.], v. 11, n. 7, p. 814, 2019. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/rs11070814>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-4292/11/7/814>. Acesso em: 25 de maio de 2021. <https://doi.org/10.3390/rs11070814>

Recebido em: 17/06/2021

Aceito para publicação em: 03/08/2021