



Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>



Seis anos de seca: Análise Espaço-temporal dos Espelhos d'água dos Reservatórios do Ceará por Sensoriamento Remoto

Antônio Helton da Silva Barbosa¹, Miguel Dragomir Zanic Cuellar², Melquisedec Medeiros Moreira³, Kátia Alves Arraes⁴ & Camila Saiury Pereira Silva⁵

¹Ms. Pesquisador e Bolsista do Programa de Capacitação Institucional do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) - Coordenação Espacial do Nordeste (COENE), e-mail: antonio.s.barbosa@inpe.br. ²Esp. Pesquisador e Servidor aposentado, INPE-COENE, e-mail: miguel.cuellar@inpe.br. ³Dr. Pesquisador Associado ao Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI), INPE-COENE, e-mail: melquisedec.moreira@inpe.br. ⁴Ms. Pesquisadora e Tecnologista Sênior III, INPE-COENE, e-mail: katia.arraes@inpe.br. ⁵Ms. Pesquisadora e Bolsista do Programa de Capacitação Institucional do INPE-COENE, e-mail: camila.saiury@inpe.br.

Artigo recebido em 14/04/2020 e aceito em 16/07/2021

RESUMO

Nos últimos anos, em meio à seca e crise hídrica que afetou várias regiões do Brasil, em particular a região semiárida, as reservas hídricas superficiais vêm sendo constantemente monitoradas. Nesse contexto, o objetivo deste estudo foi mapear e analisar, por meio de Sensoriamento Remoto, a dinâmica dos espelhos d'água dos principais reservatórios do Ceará, a fim de mostrar como a área dos espelhos d'água dos reservatórios foram afetados pelas precipitações abaixo da média durante os últimos seis anos de seca, compreendendo os anos de 2012 a 2017. Para isso, foi utilizado a plataforma *Google Earth Engine* para analisar imagens do Landsat, compreendendo o período interanual de 2012 a 2017. 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. 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. Em virtude do número elevado de reservatórios, a utilização de imagens de satélite e técnicas de Sensoriamento Remoto são fundamentais para mensurar os efeitos da seca sobre as barragens. 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.

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

Six years of drought: Spatio-temporal Analysis of Water Mirrors in Ceará Reservoirs by Remote Sensing

ABSTRACT

In recent years, in the midst of drought and water crisis that has affected several regions of Brazil, in particular the semi-arid region, surface water reserves have been constantly monitored. In this context, the objective of this study was to map and analyze, through Remote Sensing, the dynamics of the water mirrors of the main reservoirs in Ceará, in order to show how the area of the water mirrors of the reservoirs were affected by the precipitations below of the average during the last six years of drought, comprising the years 2012 to 2017. For this, the Google Earth Engine platform was used to analyze Landsat images, comprising the interannual period from 2012 to 2017. For the delimitation of the waters, an enhancement technique was used to convert the RGB images to HVS, creating a panchromatic image and facilitating the process of identifying the water mirrors. Thus, the results indicated that all reservoirs lost area, where some even dried up completely. The results also suggest that the reservoirs located in the hydrographic basins of the wetter climate showed less loss of area compared to those of the drier climate. Due to the high number of reservoirs, the use of satellite images and Remote Sensing techniques are essential to measure the effects of drought on dams. Such information is extremely important for the planning and environmental management of water resources, from the perspective of promoting supply policies and, with this, expanding the capacity to face problems related to water security.

Keywords: Semi-arid, Water resources, Dams, Google Earth Engine, Landsat.

Introdução

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 et al., 1996; Pekel et al., 2016).

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 (Cunha et al., 2018), assim como as reservas hídricas superficiais (Gomes e Lima, 2021; Medeiros et al., 2021), vêm sendo constantemente estudadas e monitoradas, principalmente devido a importância dos recursos hídricos para o suporte à vida e ao desenvolvimento socioeconômico da região semiárida do Brasil.

Além disso, a tendência de aumento significativo dos dias consecutivos de chuva, intensificando a sazonalidade, com as estações secas tornando-se mais secas na região Nordeste do Brasil, destacam as preocupações de uma área marcada pela escassez de recursos hídricos perenes e pela ameaça da desertificação (Costa et al., 2020).

Sob a perspectiva de escassez e por se tratar de um tema de grande relevância, visto que os recursos hídricos são imprescindíveis para a humanidade, o monitoramento periódico dos sistemas hídricos é essencial para promover o gerenciamento adequado das águas.

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 et al., 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 et al., 2019).

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).

Dessa forma, a identificação de corpos d'água pode ser útil de várias maneiras, incluindo estimativa de disponibilidade de água, demarcação de regiões inundadas, detecção de alterações (Acharya et al., 2016), avaliação de áreas inundáveis (Bandim e Galvêncio, 2021), discriminação de lagoas costeiras artificiais de aquicultura e salinicultura (Diniz et al., 2021) e assim por diante.

Outros exemplos são as aplicações em pesquisas para classificação de corpos d'água (KO et al., 2015); monitoramento da qualidade da água (Machado e Baptista, 2015; Lopes et al., 2015; Xu et al., 2021), do volume em reservatórios (Duan e Bastiaanssen, 2013; Namikawa, 2015), da temperatura (Dugdale, 2016), da dinâmica espacial global da água (Pekel et al., 2016; Klein et al., 2017; Yao et al., 2019; Pickens et al., 2020); mapeamento territorial (Moreira, 2002; Martins et al., 2017; Moreira et al., 2018) e local dos espelhos d'água (Tan et al., 2019; Nóbrega et al., 2019); assim como a dessecação de lagos (Rokni et al., 2014; Tourian et al., 2015), mapear e monitorar áreas úmidas (Perennou et al., 2018) e avaliação multitemporal do espelho d'água (Souza et al., 2019).

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*.

A aplicação 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.

Assim, 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 do Ceará, a fim de mostrar como a área dos espelhos d'água dos reservatórios foram afetados pelas precipitações abaixo da média durante os últimos seis anos de seca, compreendendo os anos de 2012 a 2017.

Materiais e métodos

Caracterização da área de estudo

A área de estudo engloba os principais reservatórios inseridos, geograficamente, nas principais regiões hidrográficas do Ceará, como mostra a figura 1. O Estado do Ceará está dividido em 11 bacias hidrográficas, sendo a Jaguaribe a maior em área (42.020 km²) e disponibilidade hídrica superficial, ocupando mais de 28% do território cearense (COGERH, 2019).

Nessas bacias, foram construídos vários reservatórios a fim de se criarem reservas hídricas superficiais, promover o uso múltiplo das águas e diminuir a vulnerabilidade a secas e inundações nesta região. Com a construção dos reservatórios, alguns trechos do rio Jaguaribe foram perenizados a jusante das barragens com maior capacidade hídrica como, por exemplo, Orós e Castanhão.

Desse modo, para alcançar os objetivos propostos neste estudo, foram mapeados os reservatórios estratégicos para o abastecimento do Ceará e que possuem capacidade hídrica acima de 19 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), Secretaria dos Recursos Hídricos do Ceará (SRH) e Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (COGERH).

Fatores geoambientais

A disposição dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos depende de muitas relações mútuas, sobretudo dos fatores climáticos, geomorfológicos e geológicos.

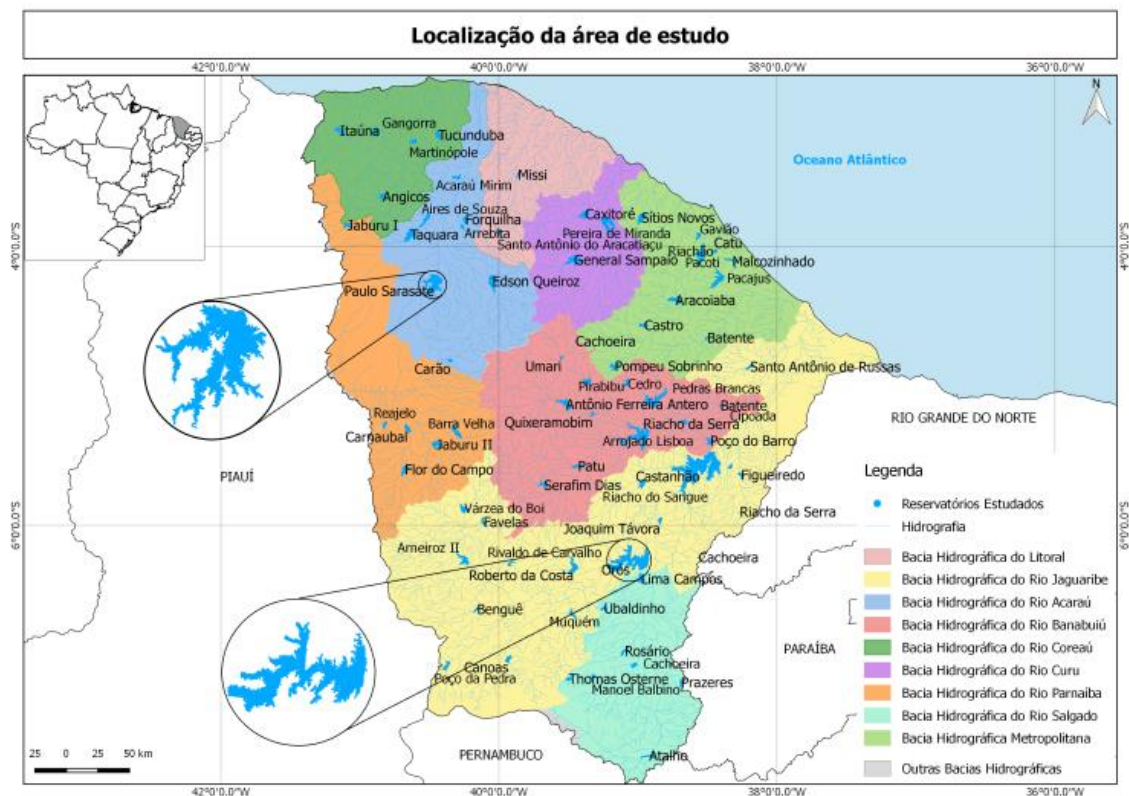


Figura 1. Localização dos reservatórios estudados, drenagens e limites das bacias hidrográficas do Estado do Ceará.

Assim, a análise integrada do meio físico por esses fatores, permitem um melhor

entendimento sobre as relações geológico-ambientais e o comportamento das reservas hídricas frente aos eventos de seca.

Nessa conjuntura, o Ceará 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 quente semiárido, ocorrendo em cerca de 68% da área total do Estado (IPECE, 2021). Já a porção

úmida e subúmida do Estado concentra-se em parte do litoral e nas áreas que registram maior elevação topográfica.

Cita-se ainda os tipos climáticos tropical subquente subúmido, tropical quente subúmido e tropical úmido, observado na figura 2. O regime pluviométrico apresenta chuvas mal distribuídas durante o ano e concentradas principalmente no primeiro semestre.

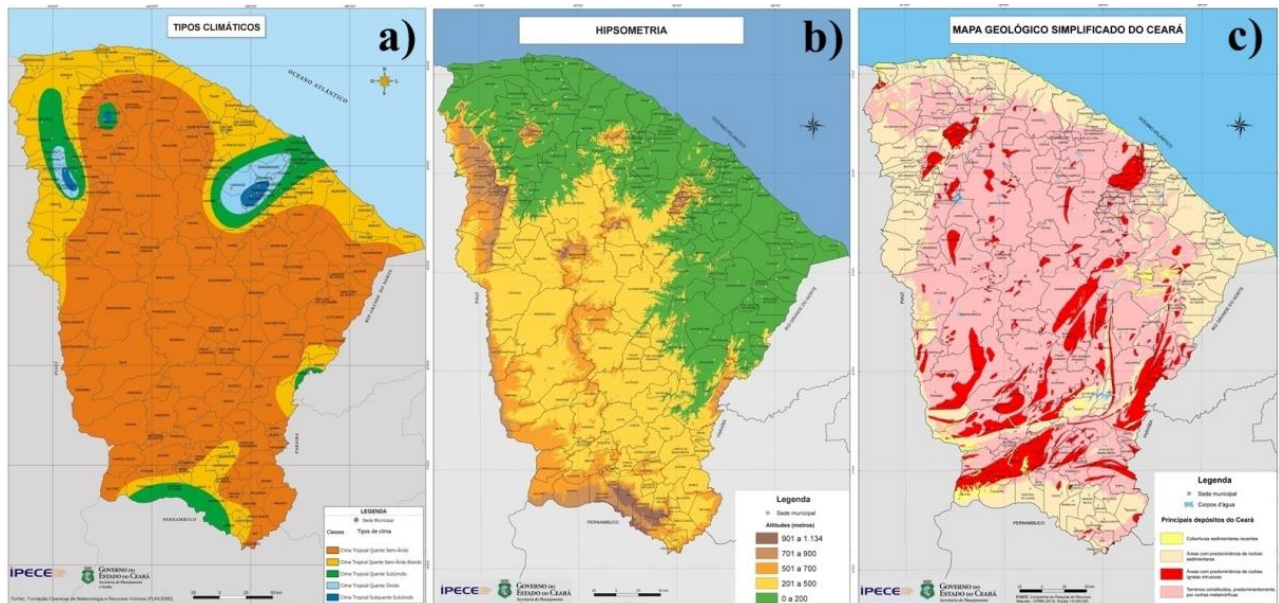


Figura 2. Mapas temáticos do Ceará: a) Tipos climáticos b) Hipsometria c) Geologia Simplificada. Fonte: IPECE, 2007.

Em termos de relevo, o Ceará comporta características de um conjunto de fatores, abrigando em seu território regiões de baixa, média e alta altitude. Já a sua estrutura geológica complexa pode ser simplificada em rochas sedimentares e rochas cristalinas. Estas últimas, ocupam uma área que corresponde a cerca de 85% do Estado (IPECE, 2021).

Identificação dos espelhos d'água e processamento dos dados

Várias são as técnicas de sensoriamento remoto para a identificação de corpos d'água (Elsahabi et al., 2016). Essa gama 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 et al., 2017) e/ou passivos (Estupinan-Suarez et al., 2015; Mueller et al., 2016); de diferentes resoluções espaciais (Sarp e Ozelik, 2017; Chen et al., 2018), espectrais e temporais (Cooley et al., 2017).

Assim, para realizar o mapeamento espacial e temporal do comportamento das

principais reservas hídricas superficiais do Ceará 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 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, foram utilizados 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, denominados “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* (Darwish *et al.*, 2003).

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.

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.

Por fim, de posse dos 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 no Ceará.

Além disso, para poder relacionar a diminuição dos espelhos d'água com a redução das precipitações, foram elaborados gráficos da precipitação média anual das bacias hidrográficas para o período de 2011 a 2017 (Figura 3), com os dados pluviométricos disponibilizados pela Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME).



Figura 3. Precipitação média anual das bacias hidrográficas para o período de 2011 a 2017. Fonte: adaptado da FUNCEME, 2021.

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 69 reservatórios, sendo dois na bacia Litoral, três na bacia Curu, cinco na bacia Coreaú, seis na bacia do Parnaíba, oito na bacia Acaraú, oito na bacia do Salgado, 11 na bacia do Banabuiú, 11 na bacia Metropolitana e 15 na bacia Jaguaribe. 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_Ceara.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 (perda de área) durante o período estudado, tendo como base o ano de 2012, bem como a capacidade hídrica dos reservatórios da bacia Parnaíba.

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

Reservatórios	Capacidade (m³)	Área dos Espelhos D'Água (Km²)						Variação Percentual de Área: (+) Ganho e (-) Perda
		2012	2013	2014	2015	2016	2017	
Barra Velha	99.500.000	9,30	5,16	2,86	0,15	0,00	0,00	- 100
Flor do Campo	111.300.000	8,00	4,22	1,18	0,00	2,64	0,65	- 91,88
Jaburu I	138.127.743	8,50	6,88	5,23	3,36	2,72	3,43	- 59,65
Jaburu II	116.000.000	7,72	2,52	0,93	2,59	1,17	0,00	- 100
Carnaubal	87.690.000	3,13	0,23	0,41	0,00	0,00	0,00	- 100
Realejo	31.551.120	2,28	1,04	0,61	0,14	0,84	0,38	- 83,33

Os resultados das análises apresentados na Tabela 1, indicaram que dos seis reservatórios mapeados na bacia Parnaíba, apenas os reservatórios Jaburu I e Reajelo mantiveram os espelhos d'água durante o período analisado. Entre os reservatórios citados, Reajelo apresentou a maior redução, chegando a perder quase 84% de

sua área. Já Jaburu I apresentou a segunda maior redução, com aproximadamente 59%.

Além disso, cabe destacar que o Jaburu I (Figura 4) possui a maior capacidade hídrica desta bacia, com 138 milhões de m³ (Tabela 1), estando localizado no alto curso da bacia hidrográfica do rio Jaburu.

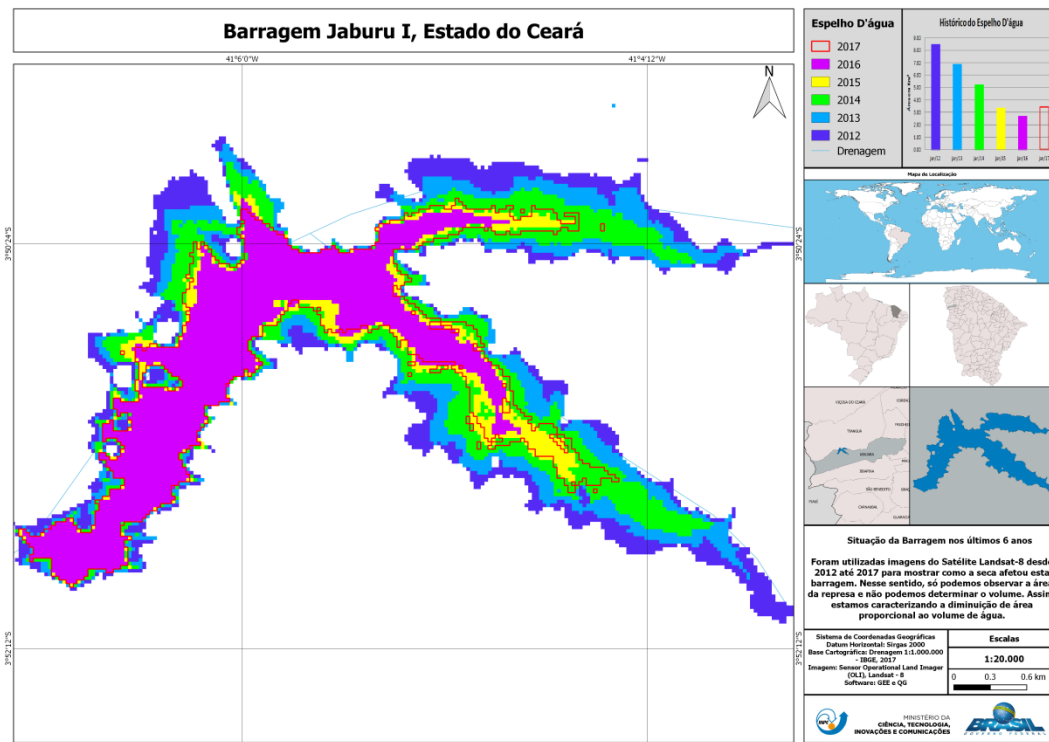


Figura 4. Dinâmica do espelho d'água do reservatório Jaburu I, Ceará.

Nessa perspectiva, a capacidade hídrica e sobretudo dos agentes climáticos, geomorfológicos e geológicos foram, sem dúvida, os principais fatores que contribuíram diretamente para o cenário de manutenção do espelho d'água durante o período analisado.

Em contraponto, localizado no alto curso do rio Poti e em região de meio físico distinto ao reservatório Jaburu I, o reservatório de Carnaubal apresentou ausência do espelho d'água a partir do período de 2015, e assim se manteve também em janeiro de 2016 e 2017.

No mesmo panorama, Barra Velha exibiu igualmente ausência do espelho d'água para 2016 e 2017. Já o Flor do Campo retratou este cenário de perda total somente para o período de 2015, voltando a expandir sua área em 2016 (2,64 km²) e reduzindo novamente em 2017.

Nesse mesmo ano, Jaburu II não conseguiu resistir aos sucessivos anos de seca e perdeu totalmente o seu espelho d'água, apesar de possuir uma capacidade hídrica superior a 116 milhões de m³. Assim, fica a cargo da fisiografia local (clima, geologia e geomorfologia) e da gestão das águas de sua bacia hidrográfica a possível explicação para o ocorrido.

Ademais, as informações do gráfico de precipitação média anual da bacia Parnaíba para o período de 2011 a 2017 (Figura 5), auxiliam no entendimento da dinâmica dos espelhos d'água destes reservatórios, tendo em vista que as precipitações os afetam diretamente.

Além disso, no gráfico é possível perceber uma redução significativa dos valores de precipitação pluviométrica no ano de 2012 (283,1 mm) quando comparado aos valores de precipitação do ano anterior (808,6 mm), ano de

2011. Nos cinco anos seguintes, apesar de apresentar aumentos nos valores médios (aproximadamente 173,5 mm) em relação a 2012, ainda estão muito abaixo da normal climatológica (662,8 mm) para esta bacia (FUNCEME, 2021). Assim, a análise do comportamento das precipitações nesta bacia, ajudam a explicar a dinâmica de ganho e perda anual de área observada nestes reservatórios.

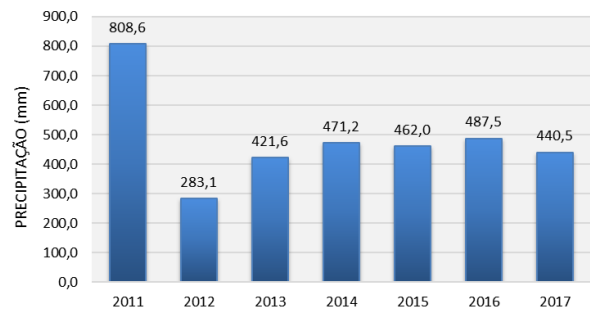


Figura 5. Precipitação média anual da bacia Parnaíba para o período de 2011 a 2017. Fonte: adaptado da FUNCEME, 2021.

Na bacia do Rio Jaguaribe, maior bacia hidrográfica do Estado, foram analisados 15 reservatórios. A exemplo do que houve na bacia do rio Paraíba, os reservatórios com baixa capacidade hídrica desta bacia também apresentaram grande dificuldade para manter seus espelhos d'água.

Nesse contexto, 80% dos reservatórios apresentaram reduções progressivas de suas áreas, sendo que quatro perderam completamente seus espelhos d'água, como mostra a Tabela 2.

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

Reservatórios	Capacidade (m ³)	Área dos Espelhos D'Água (Km ²)						Variação Percentual de Área: (+) Ganho e (-) Perda
		2012	2013	2014	2015	2016	2017	
Padre Cícero (Castanhão)	6.700.000.000	275,16	211,49	167,65	87,58	43,79	26,17	- 90,49
Orós	1.940.000.000	157,16	114,90	100,60	80,55	63,00	27,79	- 82,32
Roberto da Costa	301.000.000	16,76	15,10	13,18	10,44	7,78	5,73	- 65,81
Arneiroz II	197.060.000	11,81	7,50	4,75	2,78	7,20	5,62	- 52,41
Riacho de Sangue	61.424.000	6,26	4,12	2,71	1,37	0,31	0,02	- 99,68
Santo Antônio de Russas	24.000.000	4,40	2,42	1,51	0,07	0,00	0,10	- 97,73
Poço da Pedra	52.000.000	3,31	1,54	1,09	0,53	0,19	0,00	- 100

Muquém	47.643.406	3,08	2,81	2,28	2,27	1,44	0,85	- 72,40
Benguê	19.560.000	1,93	1,29	1,01	0,93	1,06	0,76	- 60,62
Rivaldo de Carvalho	19.520.000	2,02	1,08	0,88	0,61	0,22	0,00	- 100
Várzea do Boi	51.910.000	2,97	0,01	0,00	0,00	0,24	0,00	- 100
Favelas	30.100.000	3,53	1,82	0,51	0,05	0,00	0,00	- 100
Riacho da Serra	23.470.000	1,77	1,54	1,15	0,59	0,41	0,01	- 99,44
Canoas	69.250.000	3,88	2,74	2,04	1,87	2,17	2,50	- 35,57
Joaquim Távora	26.772.800	3,45	3,37	3,23	2,28	1,47	0,92	- 73,33

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 Jaguaribe. Assim, os reservatórios de grande capacidade hídrica também tiveram uma alta taxa de redução de área.

Nessa perspectiva, o reservatório Padre Cícero (Figura 6), mais conhecido como Castanhão, é o maior reservatório público do país para múltiplos usos e tem capacidade para acumular 6,7 bilhões de m³ de água, ainda assim perdeu 90% de seu espelho d'água.

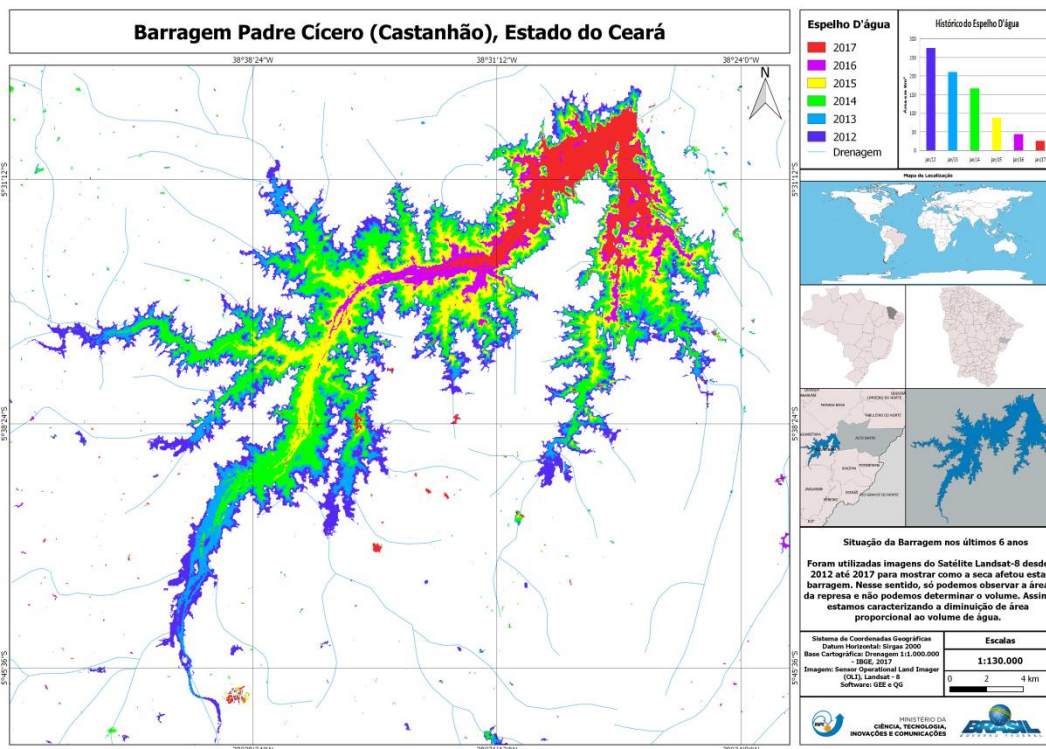


Figura 6 Dinâmica do espelho d'água do reservatório Padre Cícero, Ceará.

Os resultados das imagens revelam uma perda de extensão da água a uma taxa média de, aproximadamente, 49 km² a cada ano mapeado; chegando a um total de perda de 248,99 km².

Mais a montante, o reservatório de Orós, segundo maior do Ceará e com capacidade de 1,9 bilhões de m³ de água, teve uma redução de mais de 80% de sua área inundada.

As informações da figura 7, ajudam a explicar as perdas de área dos espelhos d'água destes reservatórios, tendo em vista que as precipitações os afetam diretamente.

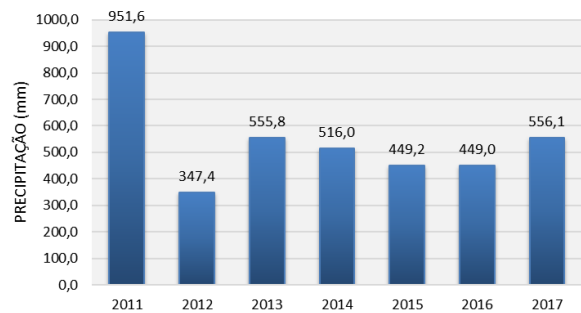


Figura 7. Precipitação média anual da bacia Jaguaribe para o período de 2011 a 2017. Fonte: adaptado da FUNCEME, 2021.

No gráfico (Figura7) é possível identificar uma redução de quase 1/3 dos valores de precipitação pluviométrica no ano de 2012 (347,4 mm) quando comparado aos valores de precipitação do ano anterior (951,6 mm), ano de 2011, ficando também abaixo da normal climatológica (698,8 mm) para esta bacia os anos seguintes (FUNCEME, 2021).

A relação da distribuição temporal da precipitação com a dinâmica dos espelhos d'água dos reservatórios, corrobora com as observações feitas por Medeiros et al. (2018), ao estudar o incremento/decremento do depósito d'água em

reservatórios inseridos no semiárido. Nela o autor constatou que os volumes armazenados no Castanhão foram afetados pela variabilidade anual da precipitação em dois anos extremos, em comparação a um ano dentro da média climatológica. Além disso, no ano chuvoso, o impacto hidrometeorológico ocorreu instantaneamente. Em contrapartida, no ano seco, o efeito da precipitação foi visualizado somente após dois meses (Medeiros et al., 2018).

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

Reservatórios	Capacidade (m ³)	Área dos Espelhos D'Água (Km ²)						Variação Percentual de Área: (+) Ganho e (-) Perda
		2012	2013	2014	2015	2016	2017	
Arrojado Lisboa (Banabuiú)	1.601.000.000	63,30	33,37	16,04	3,52	2,20	2,03	- 96,79
Pedras Brancas	434.051.500	40,47	30,91	26,63	18,68	10,13	7,88	- 80,53
Antônio Ferreira Antero	118.820.000	10,88	5,75	2,10	0,08	0,03	0,31	- 97,15
Cipoada	86.090.000	3,26	1,36	1,89	0,80	0,29	0,68	- 79,14
Poço do Barro	54.703.500	1,56	0,81	0,88	0,46	0,28	0,13	- 91,67
Patu	71.829.000	3,66	2,63	2,03	0,90	0,47	0,26	- 92,90
Serafim Dias	43.000.000	2,76	1,58	0,60	0,12	0,00	0,00	- 100
Cedro	125.694.000	6,09	4,11	2,69	1,26	0,54	0,84	- 86,21
Umari	35.040.000	1,55	0,42	0,08	0,00	0,00	3,01	+ 94,19
Quixeramobim	54.000.000	1,33	1,19	0,91	0,01	0,00	0,02	- 98,50
Pirabibu	74.000.000	3,79	1,74	1,25	0,00	0,00	0,29	- 92,35

Outra respeitável bacia, avaliada como principal tributário do Jaguaribe, é a Banabuiú, uma importante sub-bacia localizada na região sertão central. Nesta bacia, foram analisados 11 reservatórios dos quais dez apresentaram grandes reduções de suas áreas, sendo que apenas o Serafim Dias perdeu completamente seu espelho d'água a partir do ano de 2016, como mostra a Tabela 3.

Na mesma bacia, o reservatório Arrojado Lisboa (Figura 8), mais conhecido como Banabuiú, é o maior reservatório desta bacia e terceiro maior do Estado. Embora possua capacidade para acumular uma grande quantidade de água, 1,6 bilhões de m³, perdeu mais de 96% de sua área ao longo dos seis anos avaliados, sendo os três primeiros anos os de maior perda.

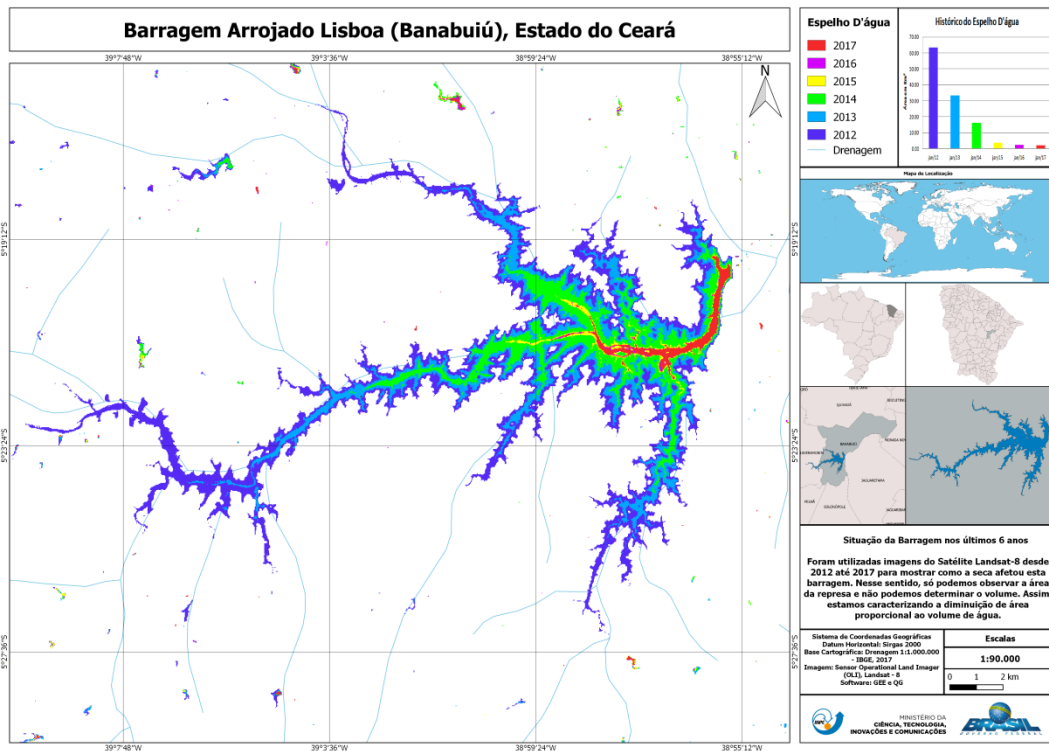


Figura 8. Dinâmica do espelho d'água do reservatório Arrojado Lisboa, Ceará.

No contexto geral, é necessário destacar que na bacia Banabuiú somente o reservatório de Umari apresentou aumento expressivo de seu espelho d'água, fato ocorrido no ano de 2017 em relação a todo o período anterior. Este reservatório obteve um aumento de 94% de sua área em relação ao ano base de 2012, mesmo tendo apresentado ausência de espelho d'água nos anos anteriores de 2015 e 2016. Esse episódio pode estar relacionado à recente construção deste reservatório, que foi concluído em meados de junho de 2011, logo após os meses de maior pluviosidade. Dessa forma, não houve tempo o suficiente para que Umari atingisse todo o potencial de sua capacidade hídrica, diferentemente dos demais reservatórios que já estavam cheios nesse momento.

Na figura 9 é possível observar a redução dos valores de precipitação pluviométrica no ano de 2012, quando comparado ao valor da precipitação de 2011 (861,3 mm), ficando também abaixo da normal climatológica (668,1 mm) para esta bacia (FUNCEME, 2021). Os demais anos da série (2013 a 2017), também ficaram abaixo da

média e ajudaram a entender as perdas de área apresentada pelos reservatórios da bacia Banabuiú.

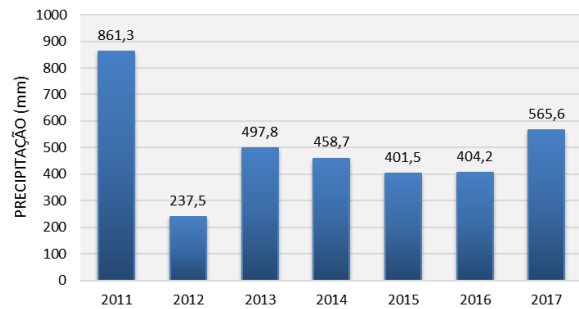


Figura 9. Precipitação média anual da bacia Banabuiú para o período de 2011 a 2017. Fonte: adaptado da FUNCEME, 2021.

A bacia do rio Salgado, outra importante sub-bacia do rio Jaguaribe, está localizada na região sul do Ceará. Nela foram analisadas as dinâmicas de perda de área dos espelhos d'água de oito reservatórios, conforme pode ser observado na tabela 4.

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

Reservatórios	Capacidade (m ³)	Área dos Espelhos D'Água (Km ²)						Variação Percentual de Área: (+) Ganho e (-) Perda
		2012	2013	2014	2015	2016	2017	
Atalho	108.205.000	1,94	0,90	0,72	0,67	0,58	0,70	- 63,92
Prazeres	32.500.000	1,17	0,80	0,58	0,40	0,23	0,20	- 82,91
Cachoeira	34.330.000	2,15	1,53	1,30	1,00	0,68	0,42	- 80,47
Thomas Osterne	28.780.000	1,05	0,48	0,56	0,64	0,43	0,32	- 69,52
Manoel Balbino	37.180.000	1,07	0,83	0,66	0,49	0,36	0,12	- 88,79
Rosário	47.200.000	3,89	2,73	3,00	2,14	1,78	1,66	- 57,33
Ubalzinho	31.800.000	5,17	4,17	3,81	3,25	2,79	2,71	- 47,58
Lima Campos	66.382.000	6,81	6,77	6,62	6,36	3,73	2,59	- 61,97

O comportamento de redução progressiva de área dos espelhos d'água na bacia Salgado se manteve em seis reservatórios, sendo que nenhum perdeu completamente seu espelho d'água, mesmo aqueles com baixa capacidade hídrica. Apesar desse fato, ainda assim perderam, em média, mais de 45% de suas áreas. O reservatório Manoel Balbino foi o mais afetado, reduzindo em 88% a sua área inundada.

O gráfico da precipitação média anual da bacia Salgado (Figura 10) ajuda a entender a dinâmica de perda de área nestes reservatórios. O valor da precipitação de 2012 (511,2 mm) ficou muito abaixo do ano anterior (1.186,5 mm) e abaixo da normal climatológica (866,7 mm) para a bacia Salgado (FUNCEME, 2021).

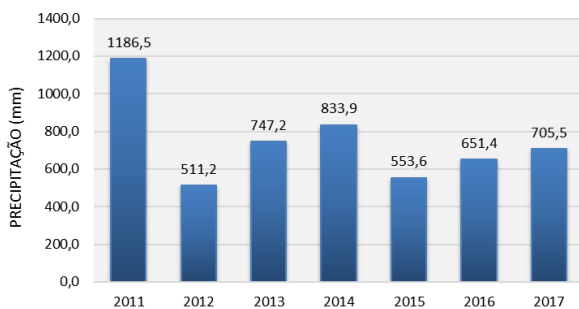


Figura 10. Precipitação média anual da bacia Salgado para o período de 2011 a 2017. Fonte: adaptado da FUNCEME, 2021.

Valores muito abaixo da média em um ano, como ocorreu em 2012, podem afetar diretamente na recuperação dos reservatórios nos anos seguintes, mesmo que as precipitações apresentem valores próximos da normal climatológica, como ocorreu em 2014.

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), afirmaram 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.

A tendência de manutenção da água superficial também foi observada para todos os reservatórios das bacias hidrográficas Litoral e Curu, como mostram as Tabelas 5 e 6.

Tabela 5. Variação temporal das áreas dos espelhos d'água dos reservatórios da bacia Litoral.

Reservatórios	Capacidade (m ³)	Área dos Espelhos D'Água (Km ²)						Variação Percentual de Área: (+) Ganho e (-) Perda
		2012	2013	2014	2015	2016	2017	
Missi	65.301.000	6,41	4,71	2,96	2,35	2,49	4,17	- 34,95
Santo Antônio do Aracatiaçu	24.340.000	3,15	1,90	1,27	0,63	0,24	0,71	- 77,46

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

Reservatórios	Capacidade (m ³)	Área dos Espelhos D'Água (Km ²)						Variação Percentual de Área: (+) Ganho e (-) Perda
		2012	2013	2014	2015	2016	2017	
Caxitoré	202.000.000	10,92	6,36	2,52	2,35	2,08	1,91	- 82,51
General Sampaio	322.200.000	12,09	6,41	2,53	2,22	1,89	8,01	- 33,75
Pereira de Miranda	395.638.000	25,28	13,76	5,36	3,79	3,14	0,94	- 96,28

No caso dessas bacias, fatores do clima, assim como, elementos do clima como, por exemplo, a influência e distribuição ao longo do ano das precipitações das zonas climáticas úmidas e subúmidas do litoral Cearense, podem ter contribuído de forma direta para o cenário de manutenção dos espelhos d'água observado para os cinco reservatórios destas bacias, apesar de apresentar precipitações abaixo da normal climatológica para as bacias Litoral (876,9 mm) e Curu (700,8 mm) (FUNCEME, 2021).

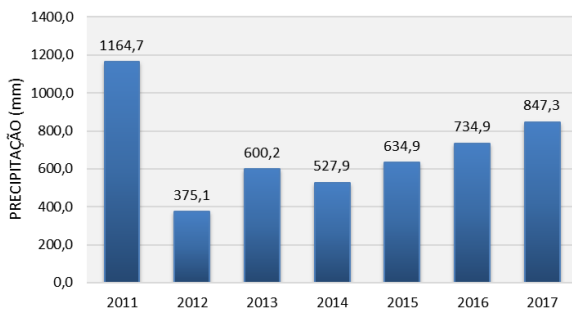


Figura 11. Precipitação média anual da bacia Litoral para o período de 2011 a 2017. Fonte: adaptado da FUNCEME, 2021.

Embora a bacia Curu possua reservatórios com capacidades que variam entre 200 e 395 milhões de m³ de água, ainda assim apresentaram reduções consideráveis de seus espelhos d'água ao

Assim, a análise da integração dos fatores geoambientais (clima, geologia e geomorfologia) já relatados aqui, podem ser a explicação para o que foi exposto sobre o comportamento das bacias Litoral e Curu. A análise temporal dos valores da precipitação média anual das bacias Litoral (Figura 11) e Curu (Figura 12), também auxiliam na compreensão da dinâmica de área dos espelhos d'água.

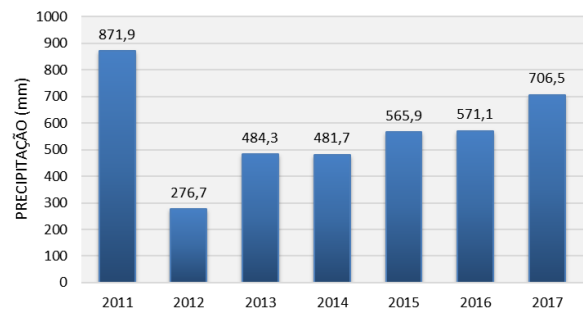


Figura 12. Precipitação média anual da bacia Curu para o período de 2011 a 2017. Fonte: adaptado da FUNCEME, 2021.

longo do período. Essa conjuntura provocou perdas significativas nas suas áreas, com valores superiores a 96%, como foi o caso do reservatório Pereira de Miranda (Figura 13).

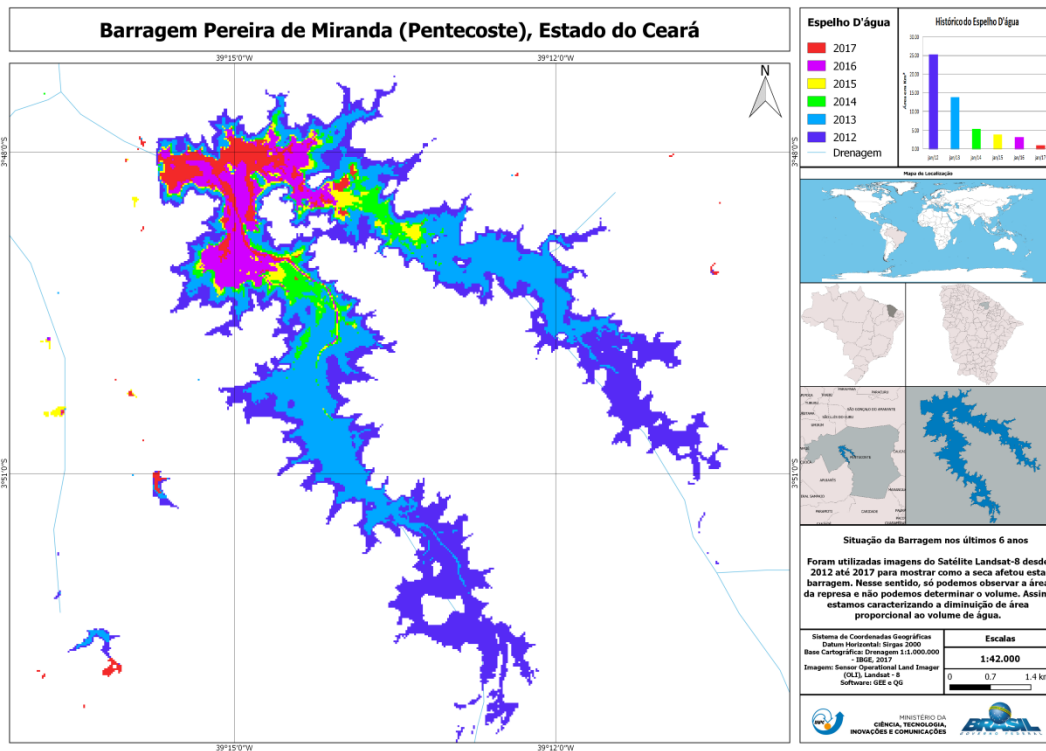


Figura 13. Dinâmica do espelho d'água do reservatório Pereira de Miranda, Ceará.

Por outro lado, é necessário destacar que nem todas as bacias e reservatórios estudados apresentaram perdas de área em sua totalidade. Ao contrário do que foi observado nas demais bacias,

alguns reservatórios da bacia Coreaú apresentaram um aumento de espelho d'água superior ao período de 2012, ano base do mapeamento, conforme pode ser visto na tabela 7.

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

Reservatórios	Capacidade (m ³)	Área dos Espelhos D'Água (Km ²)						Variação Percentual de Área: (+) Ganho e (-) Perda
		2012	2013	2014	2015	2016	2017	
Angicos	56.050.000	5,66	3,63	2,33	1,26	3,79	7,42	+ 31,10
Tucunduba	41.430.000	7,56	5,70	5,11	7,35	7,10	8,14	+ 7,67
Martinópole	23.200.000	6,22	3,64	2,37	2,25	2,24	4,19	- 32,64
Gangorra	62.500.000	8,34	6,22	4,27	3,78	4,24	6,90	- 17,27
Itaúna	77.500.000	10,60	8,52	7,38	8,60	10,69	14,66	+ 38,30

No contexto geral de aumento do espelho d'água, é necessário destacar três dos cinco reservatórios da bacia Coreaú que, além do ganho considerável apresentado pelo reservatório Angicos (Figura 14), os reservatórios de Itaúna e Tucunduba também apresentaram aumento da área inundada ao final do período de seis anos.

Os ganhos de área inundada observados nesses reservatórios foi um comportamento diferente do que foi visto para toda a bacia Coreaú, já que os demais (Martinópole e Gangorra) apresentaram perdas e tiveram suas áreas reduzidas em apenas 32% e 17%, respectivamente.

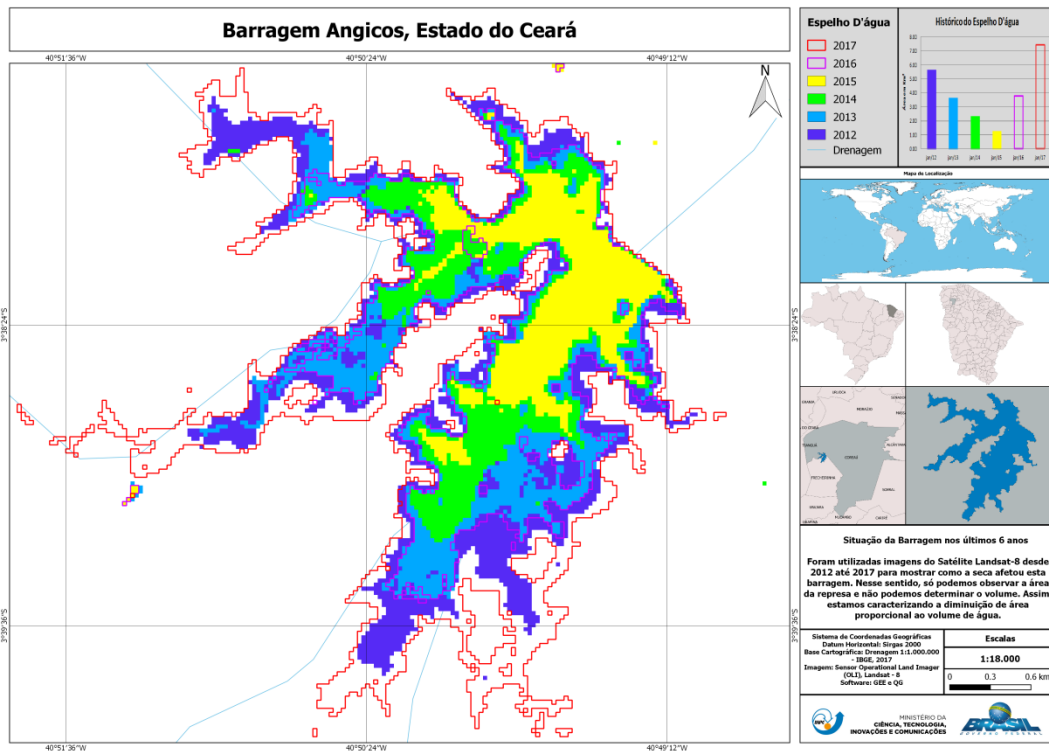


Figura 14. Dinâmica do espelho d'água do reservatório Angicos, Ceará.

Sendo assim, a bacia Coreau apresentou no geral um saldo positivo de 27% de ganho de área inundada, distintamente do que aconteceu com as outras bacias apresentadas até aqui, que apresentaram somente saldo negativo, ou seja, só apresentaram perda de área ao longo do tempo.

Ainda sob a perspectiva dos ganhos de área inundada, a influência de precipitações oriundas das zonas climáticas mais úmidas, concentradas de forma pontual nas sub-bacias dos reservatórios, podem ter contribuído para o quadro de expansão dos espelhos d'água, bem como para o baixo percentual de área reduzida nos demais reservatórios da bacia Coreau, já que o gráfico da precipitação média anual da bacia Coreau para o período de 2011 a 2017 (Figura 15), mostra precipitações muito abaixo da normal climatológica (1049,3 mm) em 2012, assim como nos anos seguintes (FUNCEME, 2021), com exceção de 2017.

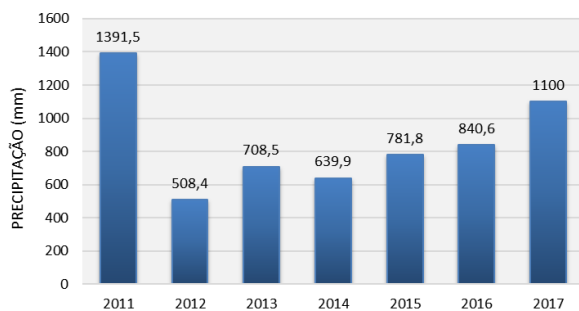


Figura 15. Precipitação média anual da bacia Coreau para o período de 2011 a 2017. Fonte: adaptado da FUNCEME, 2021.

Além disso, os dados de precipitação da figura 14 apresentam valores médios para toda a bacia Coreau e acabam por não ponderar as precipitações em escalas mais locais, ligadas individualmente à sub-bacia de cada reservatório. Isto pode ser percebido quando comparamos os dados de precipitação média anual da bacia Coreau com os dados de precipitação média anual do reservatório de Itaúna (Figura 16), que obteve o maior ganho de área para esta bacia durante o período estudado.

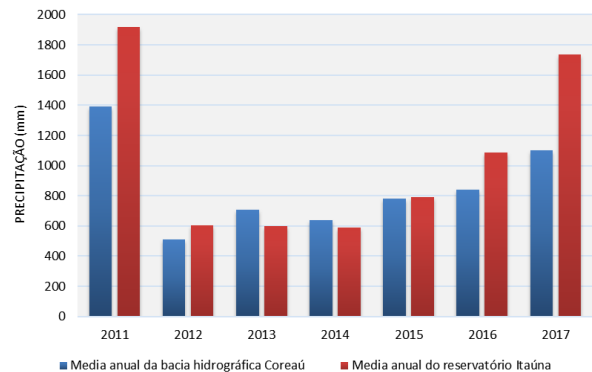


Figura 16. Precipitação média anual da bacia Coreau e do reservatório Itaúna, período de 2011 a 2017. Fonte: adaptado da FUNCEME, 2021.

Ademais, a localização geográfica dos reservatórios dentro da bacia hidrográfica Coreau

(alto, médio e baixo curso), podem também explicar as variações de área dos reservatórios que não podem ser elucidadas apenas com base nos dados da precipitação média anual da bacia.

Para mais, as cabeceiras desta bacia estão inseridas em uma região climática de exceção no contexto do semiárido cearense, o planalto da Ibiapaba. Este compartimento geomorfológico de maior elevação topográfica provoca a ocorrência de chuvas orográficas de forma pontual e exerce influência sobre as regiões hidrográficas

sopedônias dos domínios semiáridos circunvizinhos a Ibiapaba, afetando diretamente algumas reservas hídricas superficiais.

Ainda no litoral cearense, a bacia Metropolitana, localizada nas regiões da grande Fortaleza e maciço do Baturité, encontra-se o mais importante centro consumidor de água do Estado, a Região Metropolitana de Fortaleza (RMF). Nesta bacia, foram mapeadas as variações de área em 11 reservatórios, como mostra a tabela 8.

Tabela 8. Variação temporal das áreas dos espelhos d'água dos reservatórios da bacia Metropolitana.

Reservatórios	Capacidade (m ³)	Área dos Espelhos D'Água (Km ²)						Variação Percentual de Área: (+) Ganho e (-) Perda
		2012	2013	2014	2015	2016	2017	
Batente	28.900.000	5,05	4,69	4,19	2,16	0,76	1,94	- 61,58
Aracoiaba	170.700.000	12,55	7,50	5,85	5,66	3,64	3,86	- 69,24
Pompeu Sobrinho	143.000.000	7,04	4,65	3,54	1,75	1,18	2,66	- 62,22
Malcozinhado	37.840.000	5,77	4,35	3,43	2,72	2,01	1,69	- 70,71
Pacoti	380.000.000	22,56	22,35	22,27	24,21	17,67	20,18	- 10,55
Catu	27.130.000	3,36	1,92	1,37	1,10	0,98	0,78	- 76,79
Gavião	32.900.000	4,43	5,11	4,82	4,99	4,89	4,85	+ 9,48
Sítios Novos	126.000.000	14,11	9,44	3,00	1,78	0,90	1,48	- 89,51
Castro	63.900.000	3,41	2,16	1,61	0,85	0,22	0,07	- 97,95
Pacajus	240.000.000	27,69	19,54	17,54	15,77	13,28	20,21	- 27,01
Riachão	46.950.000	2,70	2,79	2,75	2,95	2,17	2,50	- 7,41

Apesar de estar localizada em uma região de clima úmido/subúmido e geologia sedimentar, a bacia Metropolitana exibiu comportamento de redução de área de mais de 60% em sete dos 11

reservatórios. Entre estes, está o reservatório Castro (Figura 17) que perdeu mais de 97% de sua superfície de água.

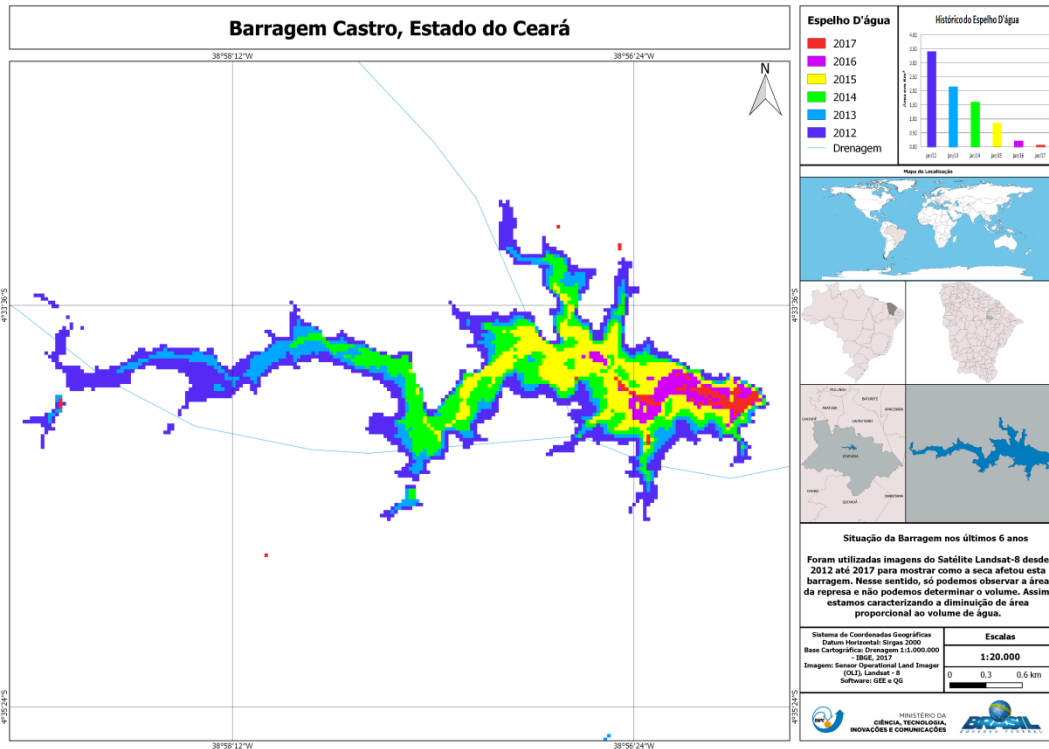


Figura 17. Dinâmica do espelho d'água do reservatório Castro, Ceará.

No entanto, cabe destacar que nenhum reservatório perdeu completamente seu espelho d'água, mesmo aqueles com baixa capacidade hídrica. O gráfico da precipitação média anual da bacia Metropolitana para o período de 2011 a 2017 (Figura 18), mostra o comportamento temporal da precipitação e pode auxiliar na compreensão do comportamento de ganho e perda de área do espelho d'água dos reservatórios observados para a bacia Metropolitana.

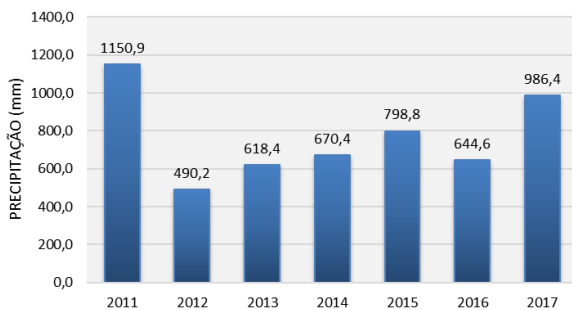


Figura 18. Precipitação média anual da bacia Metropolitana para o período de 2011 a 2017. Fonte: adaptado da FUNCEME, 2021.

Em comportamento antagônico ao que foi observado para a bacia Metropolitana está o reservatório Gavião, pois apresentou um crescimento de área de quase 10%. Este quadro de crescimento pode estar associado a chuvas concentradas na sub-bacia deste reservatório, a exemplo do que ocorreu com o reservatório de Itauá, na bacia Coreáú.

As dinâmicas de perda de água superficial dos reservatórios também foram observadas na bacia Acaraú (Tabela 9), localizada na região dos sertões de Crateús e Sobral. Nesta bacia, localizada em uma região de clima semiárido, foram mapeados os espelhos d'água de oito reservatórios.

Ainda com relação a dinâmica de perda de área dos espelhos d'água, vale ressaltar que nem mesmo os reservatórios de maior capacidade hídrica desta bacia sustentaram um bom desempenho no que diz respeito a manutenção de suas áreas superficiais de água.

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

Reservatórios	Capacidade (m ³)	Área dos Espelhos D'Água (Km ²)						Variação Percentual de Área: (+) Ganho e (-) Perda
		2012	2013	2014	2015	2016	2017	

Paulo Sarasate (Araras)	891.000.000	55,49	34,26	17,09	9,17	7,72	12,88	- 76,79
Edson Queiroz	254.000.000	18,78	14,07	9,88	6,15	4,94	9,20	- 51,01
Taquara	274.000.000	19,27	12,47	10,63	7,34	7,95	11,72	- 39,18
Aires de Souza	101.430.000	8,88	8,72	6,95	5,60	3,90	6,23	- 29,84
Forquilha	50.132.000	5,63	3,64	2,70	1,91	1,32	1,92	- 65,90
Arrebita	19.600.000	1,90	1,44	1,20	0,80	0,48	0,85	- 55,26
Acaraú Mirim	52.000.000	5,35	4,48	4,01	3,23	3,48	5,28	- 1,31
Carão	26.230.000	1,75	1,09	0,38	0,09	0,00	0,00	- 100

De acordo com os dados da Tabela 9, apenas o reservatório de Carão perdeu completamente o seu espelho d'água já no ano de 2016, cenário que se manteve em 2017. Ademais, as informações do gráfico de precipitação média anual da bacia Acaraú (Figura 19), auxiliam no entendimento da dinâmica dos espelhos d'água destes reservatórios, tendo em vista que as precipitações os afetam diretamente. Nela é observado uma redução significativa dos valores de precipitação no ano de 2012 (291,9 mm) quando comparado aos valores de precipitação do ano de 2011 (1020,1 mm).

Apesar de apresentar aumentos nos valores médios nos anos seguintes (em relação a 2012), ainda ficaram muito abaixo da normal climatológica (792,1 mm) para esta bacia (FUNCEME, 2021). Assim, a análise do

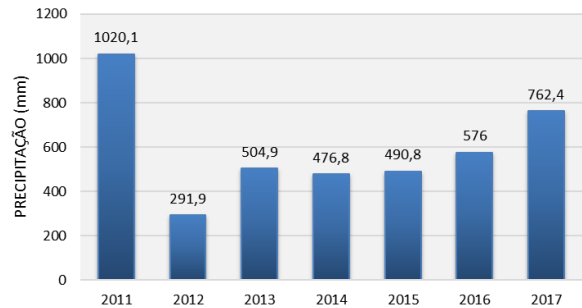


Figura 19. Precipitação média anual da bacia Acaraú para o período de 2011 a 2017. Fonte: adaptado da FUNCEME, 2021.

comportamento das precipitações nesta bacia, podem ajudar no entendimento da dinâmica de ganho e perda anual de área observada nestes reservatórios.

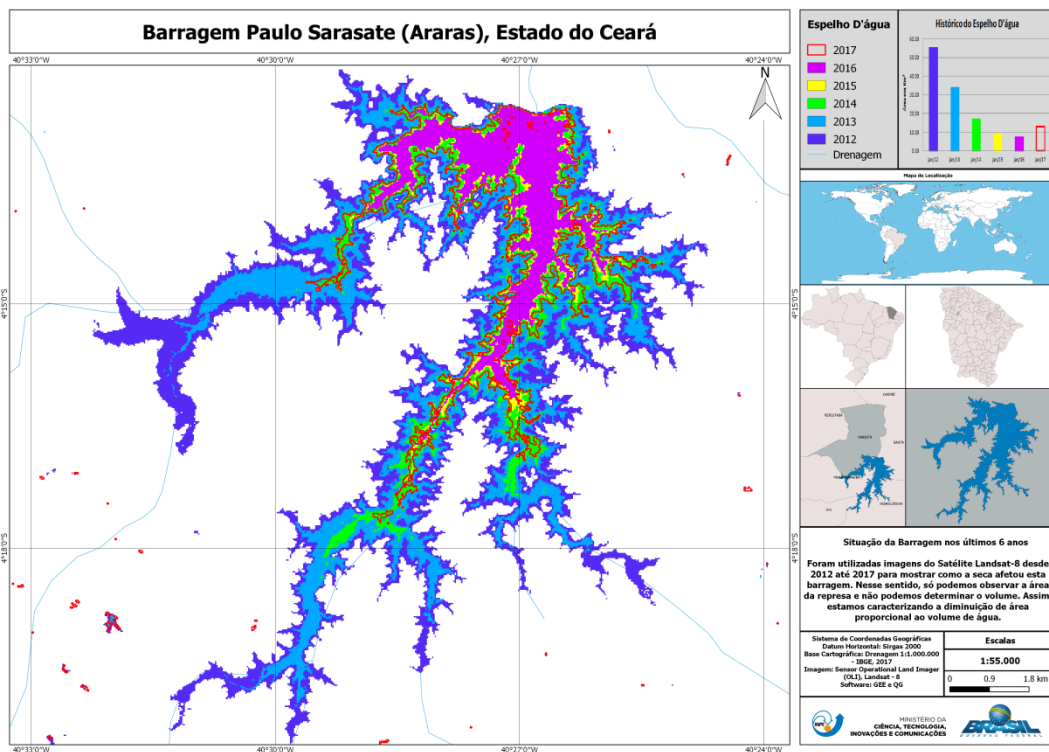


Figura 20. Dinâmica do espelho d'água do reservatório Paulo Sarasate, Ceará.

Considerado estratégico para fornecimento de água e aproveitamento hidrelétrico, o reservatório Paulo Sarasate exibiu uma redução de área superior a 76%, mesmo sendo o maior reservatório da bacia em capacidade hídrica. Este episódio de diminuição é ilustrado na figura 20.

Entre os fatores que contribuíram para o seu declínio, estão possivelmente a somatória de fatores como: capacidade hídrica, localização em região de clima semiárido e geologia cristalina; assim como de eventos de baixa precipitação na sub-bacia ligada a este reservatório.

Via de regra, no caso das bacias hidrográficas do Ceará, as baixas precipitações foram interpretadas como sendo o principal elemento do clima que provocou a redução das áreas inundadas pelos reservatórios, observadas por meio de imagens de satélite.

Por consequência, os resultados sugerem que os reservatórios localizados nos domínios climáticos mais úmidos das bacias do Norte (Litoral, Curu, Coreaú, Metropolitana e Acaraú), apresentaram menor perda de área inundada em comparação com as bacias do Sul (Parnaíba, Jaguaribe, Banabuiú e Salgado), de domínio climático mais seco.

As mudanças apontadas nesta pesquisa na redução das águas superficiais, tanto a nível de reservatórios como a nível de bacias em contextos geograficamente distintos, mostraram como as águas superficiais dos reservatórios foram afetadas durante os últimos seis anos de seca, que compreendeu o período de 2012 a 2017.

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 do Ceará, disponibilizadas pelo Sistema Olho N'Água (INSA, 2021) e Portal Hidrológico do Ceará. Assim, esses reservatórios secaram completamente durante o período de análise e/ou apresentaram área inferior a resolução espacial utilizada, 30 metros.

Da mesma maneira, pesquisas recentes que analisaram a dinâmica dos espelhos d'água nos principais reservatórios da Paraíba (Barbosa et al., 2019a) e Rio Grande do Norte (Barbosa et al., 2019b) por meio de Sensoriamento Remoto 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.

A análise da dinâmica espaço-temporal por meio de técnicas de sensoriamento remoto

mostrou-se relevante na compreensão de como os reservatórios estão respondendo aos eventos de precipitações abaixo da média, provocadas pela seca histórica que atingiu o semiárido brasileiro no período de 2012 a 2017.

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 e a capacidade hídrica dos reservatórios podem ser a explicação para o quadro de escassez observado para algumas reservas hídricas superficiais, verificadas por meio de sensoriamento remoto.

A dinâmica de expansão e redução dos espelhos d'água foram relacionados neste estudo como uma consequência direta aos eventos de precipitações, sejam elas acima ou abaixo da média. Contudo, as características climáticas, geológicas, hidrológicas e tamanho das áreas de drenagem de cada bacia, assim como suas formas de usos múltiplos, 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 et al., 2019), produzem efeitos diretos sobre as reservas hídricas superficiais.

Outrossim, a dinâmica anual dos espelhos d'água também pode ser afetadas de forma pontual pelo lançamento de efluentes líquidos, conforme hipótese levantada por Souza et al. (2019), ao realizar análise multitemporal do espelho d'água do açude Ingazeiras, Estado do Piauí, usando processamento digital de imagens e dados de pluviosidade no período de 2013 a 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 constituem a base para a compreensão do efeito das chuvas para o desenvolvimento socioeconômico e ambiental (Tulbure e Broich, 2013).

Conclusões

A seca prolongada reduziu a quantidade de água superficial disponível, de modo que os 69 reservatórios estudados tiveram redução de sua área em algum momento do período analisado.

Além disso, 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.

Desse montante, 30 reservatórios apresentaram redução progressiva ao longo do tempo, sendo que os 23 seguintes mantiveram o espelho d'água: Padre Cícero, Orós, Roberto da Costa, Riacho de Sangue, Santo Antônio de Russas, Muquém, Benguê, Riacho da Serra, Joaquim Távora, Arrojado Lisboa, Pedras Brancas, Patu, Atalho, Prazeres, Cachoeira, Manoel Balbino, Ubaldinho, Lima Campos, Caxitoré, Pereira de Miranda, Malcozinhado, Catu e Castro; e sete reservatórios chegaram ao desaparecimento total da sua lâmina d'água (Barra Velha, Poço da Pedra, Rivaldo de Carvalho, Várzea do Boi, Favelas, Serafim Dias e Carão).

Em virtude do número elevado de reservatórios existentes no Ceará, a utilização de imagens de satélite é fundamental para o 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.

Referências

- Acharya, T., et al., 2016. Identification of Water Bodies in a Landsat 8 OLI Image Using a J48 Decision Tree. *Sensors* [online] 16. Disponível: <http://dx.doi.org/10.3390/s16071075>. Acesso: 30 mar. 2020.
- Bandim, C.G.A., Galvêncio, J.D., 2021. Mapeamento das áreas de armazenamento de água em depressão, usando dados LIDAR: estudo de caso avenida caxangá. *Revista Brasileira de Geografia Física*, [s. l], 14, 058-067, 25 mar. 2021.
- Barbosa, A.H.S., et al., 2019a. Mapeamento e Análise dos Espelhos D'água dos Principais Reservatórios da Paraíba por meio de Sensoriamento Remoto. *Anais do XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*.
- Barbosa, A.H.S., et al., 2019b. Sensoriamento Remoto Aplicado à Análise dos Espelhos D'água dos Principais Reservatórios do Rio Grande do Norte. *Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*.

Os resultados deste trabalho podem ter diversos usos públicos para ajudar a entender melhor como as reservas hídricas superficiais estão respondendo aos eventos de seca extrema, 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. Além disso, tem usos potenciais nas políticas e planejamento de abastecimento, como por exemplo, a construção de novos sistemas de adutoras

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (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) do 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 para este artigo.

- Barbosa, C.C.F., Novo, E.M.L., Martins, V.S., 2019. Introdução ao Sensoriamento Remoto de Sistemas Aquáticos. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. Disponível: <http://www.dpi.inpe.br/labisa/livro/res/contendo.pdf>. Acesso: 20 mar. 2020.
- Chen, Y., et al., 2018. Extraction of Urban Water Bodies from High-Resolution Remote-Sensing Imagery Using Deep Learning. *Water* [online] 10. Disponível: <http://dx.doi.org/10.3390/w10050585>. Acesso: 10 mar. 2020.
- Cooley, S., et al., 2017. Tracking Dynamic Northern Surface Water Changes with High-Frequency Planet CubeSat Imagery. *Remote Sensing* [online] 9. Disponível: <http://dx.doi.org/10.3390/rs9121306>. Acesso: 12 mar. 2020.
- Costa, R.L., et al., 2020. Analysis of climate extremes indices over northeast Brazil from 1961 to 2014. *Weather And Climate Extremes*, [S.L.], 28, 100254, jun. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wace.2020.100254>.

- Cunha, A.P.M.A., et al., 2018. Changes in the spatial-temporal patterns of droughts in the Brazilian Northeast. *Atmospheric Science Letters*, [S.L.], v. 19, n. 10, p. 1-8, 19 set. 2018. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/asl.855>. Disponível em: <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/asl.855>. Acesso em: 27 abr. 2021.
- Cunha, A.P.M.A., et al., 2019. Extreme Drought Events over Brazil from 2011 to 2019. *Atmosphere*, [S.L.], v. 10, n. 11, p. 1-20, 24 out. 2019. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/atmos10110642>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4433/10/11/642>. Acesso em: 28 abr. 2021.
- Darwish, A., Leukert, K., Reinhardt, W., 2003. "Image segmentation for the purpose of object based classification" in *International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Neubiberg, 2039 - 2041.
- Diniz, C., et al., 2021. A Large-Scale Deep-Learning Approach for Multi-Temporal Aqua and Salt-Culture Mapping. *Remote Sensing*, [S.L.], v. 13, n. 8, p. 1415, 7 abr. 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/rs13081415>.
- Du, Y., et al., 2016. 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*, [online] 8. Disponível: <http://dx.doi.org/10.3390/rs8040354>.
- Duan, Z., Bastiaanssen, W.G.M., 2013. Estimating water volume variations in lakes and reservoirs from four operational satellite altimetry databases and satellite imagery data. *Remote Sensing Of Environment* [online] 134. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2013.03.010>. Acesso: 27 mar. 2020.
- Dugdale, S.J., 2016. A practitioner's guide to thermal infrared remote sensing of rivers and streams: recent advances, precautions and considerations. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water* [online] 3. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1002/wat2.1135>. Acesso: 26 mar. 2020.
- Elsahabi, M., et al., 2016. Performances Evaluation of Surface Water Areas Extraction Techniques Using Landsat ETM+ Data: Case Study Aswan High Dam Lake (AHDL). *Procedia Technology* [online] 2. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1016/j.protcy.2016.02.001>. Acesso: 18 fev. 2020.
- Estupinan-suarez, L.M., et al., 2015. Detection And Characterization of Colombian Wetlands: Integrating Geospatial Data With Remote Sensing Derived Data. Using Alos Palsar And Modis Imagery. *Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, International Symposium on Remote Sensing of Environment*, XL-7/W3, 11-15.
- Florenzano, T.G., 2011. Iniciação em Sensoriamento Remoto. *Oficina de Textos São Paulo - SP*, 123 p.
- FUNCEME. Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos, 2021. Disponível em: <http://www5.funceme.br/app/calendario/produto/regioes/media/anual>. Acesso em: 6 mar. 2021.
- Gomes, R.S.; LIMA, K.C., 2021. 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.], 425-437, 26 abr. 2021. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/joc.7132>. Disponível em: <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/joc.7132>. Acesso em: 27 abr. 2021.
- Huang, C., et al., 2016. Surface Water Mapping from Suomi NPP-VIIRS Imagery at 30 m Resolution via Blending with Landsat Data. *Remote Sensing* [online] 8. Disponível: <http://dx.doi.org/10.3390/rs8080631>. Acesso: 15 jan. 2020.
- INSA. Instituto Nacional do Semiárido, 2021. Sistema Olho N'Água. Disponível em: <https://olhonagua.insa.gov.br>. Acesso em: 6 mar. 2021.
- IPECE. Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará, 2007. Disponível: <http://www.ipece.ce.gov.br>. Acesso: 24 jan. 2021.
- Klein, I., et al., 2017. Global WaterPack – A 250 m resolution dataset revealing the daily dynamics of global inland water bodies. *Remote Sensing of Environment* [online] 198. Disponível:

- <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.04>
5. Acesso em: 12 dez. 2019.
- Ko, B., et al., 2015. Classification of Potential Water Bodies Using Landsat 8 OLI and a Combination of Two Boosted Random Forest Classifiers. *Sensors* [online] 15. Disponível: <http://dx.doi.org/10.3390/s150613763>. Acesso em: 3 fev. 2020.
- Lopes, H., et al., 2015. Comportamento espacial da clorofila-a no reservatório de Itaparica, rio São Francisco. *Eng. Sanit. Ambient.* [online] 20. Disponível: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522015020000111066> Acesso em: 3 fev. 2020.
- Machado, M.T.S., Baptista, G.M.M., 2015. Sensoriamento Remoto como Ferramenta de Monitoramento da Qualidade da Água do Lago Paranoá (DF). *Engenharia Sanitaria e Ambiental* [online] 21. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522016141970>. Acesso em: 3 fev. 2020.
- Martins, E.S.P.R., et al., 2017. Utilização de imagens CBERS para mapeamento dos espelhos d'água do Brasil. *Anais do XVIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*.
- Medeiros, F.J., de et al., 2021. 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, 17 mar. 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 abr. 2021.
- Medeiros, F.J., et al., 2018. Impact of the Internnual Variability of Precipitation on the Reservoirs of the Semiarid Northeast Brazil Region. *Anuário do Instituto de Geociências - Ufrj*, [S.L.], v. 41, n. 3, p. 731-741, 4 dez. 2018. Instituto de Geociências - UFRJ. http://dx.doi.org/10.11137/2018_3_731_741. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0001-37652021000101213&script=sci_arttext&tlng=en. Acesso em: 27 abr. 2021.
- Mishra, K., Prasad, P.R.C., 2015. Automatic Extraction of Water Bodies from Landsat Imagery Using Perceptron Model. *Journal of Computational Environmental Sciences* [online] 2015. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1155/2015/903465>. Acesso: 18 fev. 2020.
- Moreira, M.M., 2002. 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 Geotecnia), Universidade de Brasília, Brasília, DF. 282.
- Moreira, M.M., et al., 2018. Caracterização Geológico-Geotécnica e Piezometria do Aquífero Semi-Confinado Barreiras do Município de Natal – RN. *Anais do XX Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas/XXI Encontro Nacional de Perfuradores de Poços*, 1- 4.
- Mueller, N., et al., 2016. Water observations from space: Mapping surface water from 25 years of Landsat imagery across Australia. *Remote Sensing of Environment*, [online], 174. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2015.11.003>. Acesso: 28 mar. 2020.
- Namikawa, L.M., 2015. Imagens landsat 8 para monitoramento de volume de água em reservatórios: estudo de caso nas barragens Jaguari e Jacaréí do Sistema Cantareira. *Anais do XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*.
- Nóbrega, M.R.R., et al., 2019. Emprego da Álgebra de Bandas para o Monitoramento dos Espelhos D'água no Estado do Ceará. *Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*.
- Pekel, J., et al., 2016. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature* [online] 540. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1038/nature20584>. Acesso: 6 abr. 2020.
- Pereira, G.R., et al., 2019. Mapeamento dos Espelhos D'água de Reservatórios da Paraíba: Estudo de Caso da Transposição do Rio São Francisco. *Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*.
- Perennou, C., et al., 2018. Mapping Mediterranean Wetlands With Remote Sensing: a good-looking map is not always a good map. *Next Generation Biomonitoring: Part 1*, [S.L.], p. 243-277, 2018. Elsevier.

- <http://dx.doi.org/10.1016/bs.aecr.2017.12.002>.
- Pham-duc, B., et al., 2017. Surface Water Monitoring within Cambodia and the Vietnamese Mekong Delta over a Year, with Sentinel-1 SAR Observations. *Water* [online] 9. Disponível: <http://dx.doi.org/10.3390/w9060366>. Acesso: 2 abr. 2020.
- Pickens, A.H., et al., 2020. Mapping and sampling to characterize global inland water dynamics from 1999 to 2018 with full Landsat time-series. *Remote Sensing Of Environment*, [online] 243. Disponível: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425720301620>. Acesso em: 13 abr. 2020.
- Postel, S.L., et al., 1996. Human Appropriation of Renewable Fresh Water. *Science* [online] 271. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1126/science.271.5250.785>. Acesso em: 26 mar. 2020.
- Rokni, K., et al., 2014. Water Feature Extraction and Change Detection Using Multitemporal Landsat Imagery. *Remote Sensing* [online] 6. Disponível: <http://dx.doi.org/10.3390/rs6054173>. Acesso em: 17 jan. 2020.
- Sarp, G., Ozcelik, M., 2017. Water body extraction and change detection using time series: A case study of Lake Burdur, Turkey. *Journal of Taibah University For Science* [online] 11. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jtusci.2016.04.005>. Acesso em: 26 mar. 2020.
- Souza, C., et al., 2019. Long-Term Annual Surface Water Change in the Brazilian Amazon Biome: Potential Links with Deforestation, Infrastructure Development and Climate Change. *Water* [online] 11. Disponível: <http://dx.doi.org/10.3390/w11030566>. Acesso em: 20 mar. 2020.
- Souza, J.R., et al., 2019. Avaliação multitemporal do espelho d'água do açude ingazeiras usando processamento digital de imagens e dados de pluviosidade. *Connexio - Revista Científica da Escola de Gestão e Negócios*, [s. l.], 7, 42-55, 28 mar. 2019.
- Tan, Z., et al., 2019. Mapping inundation dynamics in a heterogeneous floodplain: Insights from integrating observations and modeling approach. *Journal Of Hydrology* [online] 572. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.02.039>. Acesso em: 7 abr. 2020.
- Tourian, M.J., et al., 2015. A spaceborne multisensor approach to monitor the desiccation of Lake Urmia in Iran. *Remote Sensing of Environment* [online] 156. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2014.10.006>. Acesso em: 30 mar. 2020.
- Tulbure, M.G., Broich, M., 2013. Spatiotemporal dynamic of surface water bodies using Landsat time-series data from 1999 to 2011. *Isprs Journal of Photogrammetry And Remote Sensing* [online] 79. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.01.010>. Acesso em: 31 mar. 2020.
- Tulbure, M.G., Broich, M., 2019. 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* [online] 658. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.390>. Acesso em: 31 mar. 2020.
- Xu, H. et al., 2021. 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.], 98, 102301, jun. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jag.2021.102301>.
- Yan, W., et al., 2019. Scan Line Intensity-Elevation Ratio (SLIER): An Airborne LiDAR Ratio Index for Automatic Water Surface Mapping. *Remote Sensing* [online] 11. Disponível: <http://dx.doi.org/10.3390/rs11070814>. Acesso em: 31 mar. 2020.
- Yao, F., et al., 2019. Constructing long-term high-frequency time series of global lake and reservoir areas using Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment* [online] 232. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2019.111210>. Acesso em: 4 mar. 2020.