

SUBMETIDO 29/04/2022
APROVADO 12/08/2022
PUBLICADO ON-LINE 16/09/2022
PUBLICADO 10/04/2024
EDITORA ASSOCIADA
Mirella Leôncio Motta e Costa

DOI: <http://dx.doi.org/10.18265/1517-0306a2022id6841>
ARTIGO ORIGINAL

Análise do comportamento da lâmina d'água do reservatório Várzea Grande, Picuí, Paraíba, por meio de sensoriamento remoto

 Fabíola Clementino da Silva Casado ^[1]
 Mário Henrique Medeiros Cavalcante de Araújo ^{[2]*}

[1] fabiola.silva@academico.ifpb.edu.br
[2] mario.araujo@ifpb.edu.br

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB), Brasil

RESUMO: A água, além de ser uma necessidade social, é um recurso fundamental aos seres vivos. Com os rápidos avanços das técnicas de processamento e análise de imagens, com foco no sensoriamento remoto, a disponibilidade do monitoramento dos recursos hídricos foi facilitada, dada a amplitude espaço-temporal que as plataformas oferecem. Os corpos d'água têm uma refletância espectral relativamente menor do que outros alvos de superfície no espectro visível e infravermelho, o que os torna facilmente detectáveis. Dessa forma, o açude Várzea Grande, localizado no estado da Paraíba, que é de grande importância para o abastecimento do município de Picuí e região, apresenta uma drástica mudança na evolução do seu volume armazenado nos últimos anos. Portanto, esta pesquisa tem como objetivo apresentar um estudo acerca do monitoramento da lâmina d'água do reservatório Várzea Grande em um determinado horizonte de tempo (10 anos). Para tal, realizou-se a modelagem do comportamento do espelho d'água, a partir da integração dos dados de ferramentas de Sensoriamento Remoto e processamento digital de imagens, avaliando a disponibilidade de imagens para o estudo da área em questão, comparando dados oficiais disponíveis com o comportamento verificado. Inicialmente, foram pesquisadas variáveis que influenciam diretamente na dinâmica do processo estudado. Dadas as variáveis em questão e após o levantamento de dados, utilizou-se imagens via satélite (CBERS, RapidEye e ResourceSat) para a construção de mapa de situação do espelho d'água para cada ano listado. Foi constatada assim a variação de área do espelho d'água durante o horizonte temporal proposto, a qual acompanhou sistematicamente os resultados das medições tradicionais de volume.

Palavras-chave: reservatório; recursos hídricos; sensoriamento remoto.

Analysis of the behavior of the water depth of the Várzea Grande reservoir, Picuí, Paraíba, through remote sensing

*Autor para correspondência.

ABSTRACT: *Water, in addition to being a social need, is a fundamental resource for living beings. And with the rapid advances in image processing and analysis techniques, with a focus on Remote Sensing, this has facilitated the monitoring of the availability of water resources, given the spatio-temporal amplitude. Water bodies have a relatively lower spectral reflectance than other surface targets in the visible and infrared spectrum, making them easily detectable. In this way, the Várzea Grande reservoir, located in Paraíba state, a reservoir of great importance for the supply of the municipality of Picuí and region, presents a drastic change in the evolution of its stored volume in recent years. Therefore, this research aims to present a study on the monitoring of the water depth of the Várzea Grande reservoir over a specific time horizon (10 years). To this end, it carried out the modeling of the behavior of the water mirror, from the integration of data from remote sensing tools and digital image processing, evaluating the availability of images for the study of the area in question, comparing the government data available with the verified behavior. Initially, variables that directly influence the dynamics of the studied process were researched. Given the variables in question and after data collection, satellite images (CBERS, RapidEye and ResourceSat) were used to build a map of the surface water situation for each year listed. Thus, the variation in the area of the water mirror during the proposed time horizon was verified, which systematically followed the results of traditional volume measurements.*

Keywords: *remote sensing; reservoir; water resources.*

1 Introdução

Ao longo das últimas três décadas, com os avanços das tecnologias espaciais, das técnicas de processamento e análise das imagens e dos dados digitais de sensoriamento remoto, potencializou-se o processo de compreensão de fenômenos geológicos, dada a amplitude espaço-temporal que o sensoriamento remoto possibilita. Uma vez que existem disponíveis diversos sistemas sensores, sejam comerciais ou não, tornou-se possível o melhor desenvolvimento de pesquisas e trabalhos nas áreas de geomorfologia, litologia, geologia glacial, geologia marinha, geologia estrutural, desastres geológicos, entre outras áreas, e, assim, as aplicações de sensoriamento remoto nas várias subdisciplinas da Ciência Geológica.

A aplicação de sensoriamento remoto em hidrologia se torna bastante recorrente pelo seu uso habitual prático. A conjuntura do comportamento hidrológico de bacias hidrográficas representa uma das principais ferramentas na gestão dos recursos hídricos, devido à capacidade de predição do regime fluvial. A disposição dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos depende de muitas relações mútuas, sobretudo dos fatores climáticos, geomorfológicos e geológicos (Barbosa *et al.*, 2021).

Além disso, a escassez de dados dificulta a análise integrada de dados geológicos e geofísicos. Devido à complexidade do regime de chuvas e à sua irregularidade no estado da Paraíba, muitas lâminas d'água dispostas chegam a perder espaço ou até mesmo desaparecer das imagens de satélites. De acordo com a Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba (AESAs), em relação às condições gerais dos reservatórios monitorados, para o início e o final do mês de janeiro de 2021, observou-se uma diminuição de 2,10% no volume total armazenado dos reservatórios monitorados pela AESA, sendo o volume total de 46,52% no início do mês e 44,42% ao final (AESAs, 2022).

O conjunto de informações de sensoriamento remoto via satélite fornece os dados de observação com alta frequência temporal e alta resolução espacial, que cobrem uma vasta área e podem ser exploradas para complementar um setor com poucos dados de medições em campo disponíveis. Em geral, os dados coletados na superfície não correspondem igualmente a dados via satélite, visto que as medições na superfície são pontuais, enquanto os dados reunidos via satélite são os valores médios espaciais de uma área ocupada por um pixel que varia de acordo com a resolução espacial. Apesar de os dados via satélite apresentarem menor exatidão, fornecem melhor estimativa em grande área, com maior eficiência e menor custo (Liu, 2006). Ademais, 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.

Em meio à crise hídrica que afetou várias regiões do Brasil nos últimos anos, as reservas hídricas superficiais vêm sendo bastante monitoradas, devido a sua importância, visto que os recursos hídricos são imprescindíveis para a humanidade. A água, além de ser uma necessidade social, é um recurso fundamental aos seres vivos, no entanto, mesmo com toda a evolução tecnológica, os corpos hídricos da região da pesquisa apresentam pouquíssimos – ou quase nulos – estudos sobre o monitoramento das suas lâminas d'águas. E por se tratar de um tema de grande relevância, o monitoramento periódico dos sistemas hídricos é essencial para promover uma gestão adequada. Nesse contexto, o sensoriamento remoto oferece uma alternativa para uma observação contínua desse 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.*, 2019a). Além disso, ainda possibilita analisar extensas áreas em menor tempo e com menor custo.

Assim, os produtos do sensoriamento remoto têm apresentado grandes aplicabilidades para o monitoramento e gestão dos recursos hídricos. Como os processos hidrológicos variam rapidamente no espaço e no tempo, as medições dos fluxos de água em um sistema geosfera-biosfera-atmosfera são alcançadas, basicamente, pelas medições pontuais em campo e por meio da simulação numérica. Este estudo propõe, de modo geral, a aplicação do processamento de imagens de sensoriamento remoto no monitoramento do comportamento da lâmina d'água do açude Várzea Grande, no município de Picuí, estado da Paraíba. De maneira específica, a intenção do estudo foi produzir um mapa que traduza a evolução desse comportamento em um horizonte de 10 anos, bem como comparar os resultados encontrados com dados observados em campo obtidos através da Agência Executiva de Gestão de Águas do Estado da Paraíba (AESAs).

Desta feita, são apresentados os princípios teóricos basilares para o desenvolvimento da pesquisa, na seção 2. Na seção 3 são descritos os procedimentos metodológicos utilizados, e na seção 4, apresentados os resultados bem como as discussões que os envolvem. Na seção 5, as considerações finais e conclusões deste trabalho são apresentadas.

2 Referencial teórico

Esta seção versa sobre os aspectos teóricos que auxiliaram na fundamentação da proposta apresentada nesta pesquisa.

2.1 Aplicação de dados de sensoriamento remoto no monitoramento dos recursos hídricos

Com os avanços tecnológicos, o sensoriamento remoto ganhou espaço entre as geotecnologias. Considera-se aqui o termo geotecnologias como sendo o conjunto de tecnologias relacionadas à aquisição, ao armazenamento em bancos de dados, ao processamento e ao desenvolvimento de aplicações utilizando informações georreferenciadas (ou geoinformações). O sensoriamento remoto consiste no uso combinado de modernos instrumentos (sensores), equipamentos para processamento e transmissão de dados, além de variadas plataformas (aéreas ou espaciais), com o objetivo de estudar eventos, fenômenos e processos que ocorrem na superfície terrestre por meio do registro e da análise das interações entre a radiação eletromagnética e as substâncias componentes em suas mais abundantes manifestações (Novo, 2010).

De acordo com Florenzano (2011, p. 11), “a obtenção de dados por sensoriamento remoto, como qualquer outra atividade, requer o uso de energia”. Essa energia se encontra impressa em cada material sobre a superfície terrestre. Assim, as imagens de satélites permitem enxergar, e “destrinchar”, o planeta de uma posição privilegiada. Destarte, as imagens obtidas por sensoriamento remoto possibilitam ampliar nossa visão espectral (para além da luz visível), espacial e temporal dos ambientes terrestres. Por meio delas, os ambientes longínquos de difícil acesso tornam-se mais acessíveis.

Na Geologia, o uso de imagens orbitais acelerou o processo de compreensão de fenômenos geológicos, dada a amplitude espaço-temporal que o sensoriamento remoto possibilita. Uma vez que existem disponíveis diversos sistemas de sensores, sejam comerciais ou não, tornou-se possível o melhor desenvolvimento de pesquisas e trabalhos nas áreas das geociências. Pode-se citar o trabalho de Strokes (2002), que utilizou imagens do sistema Landsat, para realizar um mapeamento geomorfológico de glaciares na Antártida. Nos estudos de litologia, Hoff, Leite e Zouain (2010) produziram mapas temáticos, empregando fotografias aéreas e imagens de satélite em busca de uma caracterização geológica-geotécnica, litológica, morfoestrutural e de formações superficiais. O uso de sensoriamento remoto também está presente na geologia marinha, no trabalho de Souza Filho *et al.* (2009), com a aplicação de dados multissensores para a identificação, o mapeamento e o monitoramento de ambientes fluvioestuarinos. Utilizando dados de sensoriamento remoto, Araújo (2014) realizou uma análise para classificação de uso do solo em decorrência dos desastres geológicos. Alexandre *et al.* (2019) realizaram uma análise morfométrica de uma bacia hidrográfica com base em produtos da missão topográfica de radar aerotransportado (SRTM), com o intuito de melhor compreender a dinâmica regional, objetivando auxiliar no manejo, na conservação, no planejamento e na gestão de recursos hídricos, analisando assim cerca de 14 parâmetros morfométricos.

Sem dúvida há uma vasta relação de pesquisas que, utilizando-se de sensoriamento remoto, geraram produtos e análises que contribuiriam ainda mais para o aprofundamento do conhecimento sistêmico de determinadas áreas. Do mesmo modo, o sensoriamento remoto tem sido utilizado no estudo de corpos d’água com bastante eficácia, colaborando para pesquisas de tão precioso recurso natural.

Nas últimas décadas, a utilização das técnicas de sensoriamento remoto em hidrologia ganhou impulso, principalmente, devido ao desenvolvimento de novos sensores orbitais que podem ser utilizados no monitoramento hidrológico e climático (Warren *et al.*, 2014). Além disso, o seu uso ainda possibilita analisar extensas áreas em menor tempo e com melhor custo-benefício. 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, o que os torna facilmente detectáveis (Yan; Shaker; LaRocque, 2019).

Observa-se também a importância do sensoriamento remoto para o estudo de transformações da paisagem, pois ele permite analisar o comportamento espectral da vegetação e da água para assim melhor avaliar a área de interesse e identificar causas para a modificação do curso dos rios e para a devastação das áreas de mata ciliar. Para que se possa extrair qualquer informação a partir de dados de sensoriamento remoto, é essencial o conhecimento do comportamento espectral dos objetos da superfície terrestre e dos fatores que interferem em tal comportamento.

O comportamento espectral da água é resultado dos processos de absorção e espalhamento da radiação no seu interior, e a radiação detectada pelo sensor fornece informações sobre características físico-químicas e biológicas da região estudada (Cabral *et al.*, 2003). Os processos referentes ao comportamento espectral da água consistem na aquisição simultânea de dados no espectro-radiômetro e dados *in situ* de parâmetros da qualidade da água.

O conhecimento da dinâmica dos reservatórios é outra vertente que deve ser desenvolvida ao longo do tempo e que deve considerar as especificidades de cada região estudada, uma vez que a água é recurso em escassez que deve ser utilizado de modo a potencializar seu aproveitamento. Não obstante, deve-se ressaltar a importância e necessidade desse ramo da pesquisa para a região semiárida nordestina.

Um estudo recente, de alta relevância, utilizou imagens do programa Landsat para delimitar a área de inundação de uma hidrelétrica em um período determinado, na região de Bakun, Malásia. Os dados orbitais foram utilizados para quantificar as variações de água armazenada, nível do lago e área inundada, objetivando avaliar o processo de subsidência e buscando aumentar a precisão da estimativa de deformação superficial (Tangdamrongsub *et al.*, 2019).

A disposição dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos depende de muitas relações mútuas, sobretudo dos fatores climáticos, geomorfológicos e geológicos (Liu, 2006). As águas doces superficiais formam uma pequena fração dos recursos hídricos existentes no planeta. Entretanto, o seu valor econômico e social para as populações humanas é inestimável, levando em consideração que essas águas são as mais acessíveis. Além disso, pode-se dizer que as águas doces superficiais fornecem uma gama de serviços ecossistêmicos abrangentes para toda a vida (Pekel *et al.*, 2016).

Ademais, os reservatórios, estruturas que são indispensáveis para o abastecimento da população, atualmente são tema de diversos estudos envolvendo sensoriamento remoto. Há exemplos como o estudo de Galo *et al.* (2002), que recorreram a imagens multiespectrais e multitemporais com o fim de avaliar a qualidade da água de reservatórios. Collischonn e Clarke (2016) realizaram a estimativa de cota-área-volume de reservatórios, valendo-se do sensoriamento remoto como alternativa barata aos métodos convencionais de batimetria. Para tal, foram utilizadas imagens dos satélites IRS e CBERS integrados aos dados de níveis de água dos reservatórios em estudo. Barbosa *et al.* (2019b) analisaram o comportamento espaço-temporal dos principais reservatórios do estado do Rio Grande do Norte, por meio de imagens dos satélites Landsat 7 e 8, no período de 2012 a 2017, avaliando ganho ou perda de área no período estudado. A utilização de sensores orbitais para construção de séries temporais em estudos hidrológicos tem paralelo observado em Yao *et al.* (2019), que geraram séries temporais de alta frequência e de longo prazo para lagos e reservatórios recorrendo

ao uso de imagens Landsat. Ao todo foram monitorados 428 lagos e reservatórios, num período de 26 anos. Barbosa *et al.* (2021) oferecem o mesmo paralelo no Brasil, especialmente por tratar-se de regiões com características climáticas similares à região estudada no trabalho aqui proposto.

Sendo assim, o estudo aqui apresentado consiste em uma análise do comportamento espaço-temporal da área inundada do açude Várzea Grande, localizado no estado da Paraíba (PB), por meio de imagens orbitais de sensoriamento remoto.

2.2 Importantes programas de sensoriamento remoto e as resoluções de sensores

O Programa China-Brazil Earth Resources Satellite (CBERS) nasceu de uma parceria inédita entre Brasil e China no setor técnico-científico espacial, após parceria entre o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e a Academia Chinesa de Tecnologia Espacial (CAST). O acordo internacional de cooperação com o Brasil foi assinado em 6 de julho de 1988 e produziu uma família de satélites com características singulares, a exemplo de sua carga útil de múltiplos sensores, com resoluções espaciais e frequências de observação variadas (INPE, 2018).

Já a missão comercial RapidEye, de acordo com a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), é formada por uma constelação de cinco microsatélites multiespectrais, lançados em 29 de agosto de 2008 em um único foguete russo (DNEPR-1). Cada satélite possui seu próprio nome, sendo eles: Tachys, Mati, Trochia, Choros e Choma. O desenvolvimento da missão ocorreu em parceria com empresa canadense de astronáutica, que forneceu os sistemas de pré-processamento de dados e armazenamento de imagens dos satélites (Embrapa, 2020).

Os satélites RapidEye contribuíram de maneira inestimável para o conjunto de dados de observação da Terra. No cenário mundial, o diferencial oferecido pela RapidEye é a capacidade de produzir conjuntos de imagens de qualquer ponto da Terra em pouco tempo, podendo ser utilizado para monitoramento de diversos eventos. Por meio de parceria com o Ministério do Meio Ambiente (MMA), os usuários podem ter acesso ao acervo de imagens disponíveis no Geocatálogo da entidade (Brasil, 2022).

Os satélites ResourceSat-1 e 2, juntamente com outros cinco satélites, fazem parte de um programa indiano de sensoriamento remoto denominado Indian Remote Sensing (IRS), sendo esse um programa pioneiro de mais alto perfil dentro da indústria de comércio de imagens. Esse programa oferece uma vasta possibilidade de acesso às imagens em diversas resoluções e, conseqüentemente, aplicações com satélites especializados em adquirir dados de forma temática.

A missão, em sua maior parte desenvolvida e operada pela Indian Space Research Organization (ISRO), lançou o ResourceSat-1, décimo satélite da série, em 17/04/2003 e o ResourceSat-2 em 20/04/2011. O objetivo principal dessa missão é fornecer dados de sensoriamento remoto para o National Natural Resource Management System (NNRMS) e apoiar o desenvolvimento econômico indiano, mas os dados do ResourceSat-1 e 2 também são distribuídos para outros países, inclusive para o Brasil, onde integra, após acordo único com a Índia, a política brasileira de distribuição de imagens gratuitas (Embrapa, 2020; INPE, 2020).

O Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) começou a receber, processar e distribuir sem custos imagens do satélite indiano de sensoriamento remoto, ResourceSat-2. Esse satélite conta com três câmeras, e as imagens produzidas por uma

delas estão sendo usadas para aprimorar o Deter, sistema de detecção de desmatamento criado pelo INPE. A cooperação entre o INPE e a ISRO é fruto de um acordo assinado em julho de 2014, em Brasília, durante a visita oficial do premiê indiano, Shri Narendra Modi, ao Brasil. Em 2008, os dois países já haviam celebrado acordo semelhante para a recepção dos dados do ResourceSat-1, antecessor do ResourceSat-2.

A partir de 2008, foram incorporados aproximadamente 20 satélites à missão IRS e, atualmente, configura-se a maior constelação de satélites disponível para uso civil. Os satélites se aplicam à observação da terra, ao estudo de clima e meio ambiente e ao gerenciamento de desastres (Embrapa, 2020).

Outrossim, grosso modo, pode-se dizer que os sensores são as “máquinas fotográficas” dos satélites. Independentemente do tipo de sensor, ativo ou passivo, todos possuem uma lista de características que os definem. São essas características que vão subsidiar os usuários na escolha de um sensor em função do objetivo a ser alcançado em seu estudo, trabalho ou projeto.

As resoluções são as principais características dos sistemas sensores. As resoluções temporal, espectral, espacial e radiométrica são, em geral, os parâmetros utilizados para a definição de quais produtos de sensoriamento remoto mais se adequam à necessidade do problema a ser compreendido (Jensen, 2009).

A resolução temporal é o período de revisita do sensor a uma mesma área. Ademais, cada satélite possui uma resolução temporal distinta. Quanto menor o intervalo de tempo gasto por determinado sensor para imagear novamente a mesma área, maior será sua resolução temporal. Por exemplo, o sensor Operational Land Imager (OLI), do Landsat 8, leva 16 dias para realizar uma revisita (Zanotta; Ferreira; Zortea, 2019).

As minúcias que podem ser distinguidas em uma imagem dependem da resolução espacial do sensor e representam a menor feição passível de detecção pelo instrumento em questão (Novo, 2010). As imagens de sensores remotos possuem estrutura matricial, cujo elemento principal é denominado pixel, o qual determina o tamanho do menor objeto possível de ser identificado na imagem. Assim, a resolução espacial de uma imagem refere-se ao tamanho que esse pixel representa na realidade. Por exemplo, em imagens com resolução de 10 m, um pixel equivale a uma área real de 10 m × 10 m para ser identificado. Quanto menor for a área real representada por um pixel, maior será a resolução espacial da imagem.

A resolução espectral está relacionada com o número de bandas que os sensores existentes nos satélites conseguem discretizar. As bandas estão situadas em regiões espectrais específicas e possuem larguras estreitas de comprimentos de onda que permitem distinguir um material de outro. Quanto mais bandas, melhor a resolução da imagem. Essa resolução envolve três parâmetros de medida: número de bandas, largura do comprimento de onda e posição da banda no espectro (Borges; Pacheco; Santos, 2015).

A resolução radiométrica é a capacidade de um sensor em distinguir variações no nível de energia refletida, emitida ou retroespalhada que deixa a superfície do alvo (Novo, 2010). É dada pelo número de níveis de cinza (ou DN – *digital number*) utilizados para se compor a imagem. Sob esse viés, os valores de DN são expressos em forma de números de dígitos binários (bits). Quanto maior a sua capacidade de discriminar diferenças entre intensidades de sinais provenientes dos alvos, expressa na imagem em níveis de cinza, maior resolução radiométrica.

3 Metodologia

Nesta seção são apresentados os materiais e métodos empregados na pesquisa. Em termos de recursos computacionais, foram utilizados um computador pessoal Dell Inspiron, com Processador Intel core i7, 8 GB de RAM e 1TB de memória, e o software Quantum GIS (QGIS), versão 3.24.2. A escolha do QGIS dá-se por este ser um software de Sistema de Informação Geográfica (SIG) livre, de alta robustez, evitando assim custos de aquisição de licenças de uso.

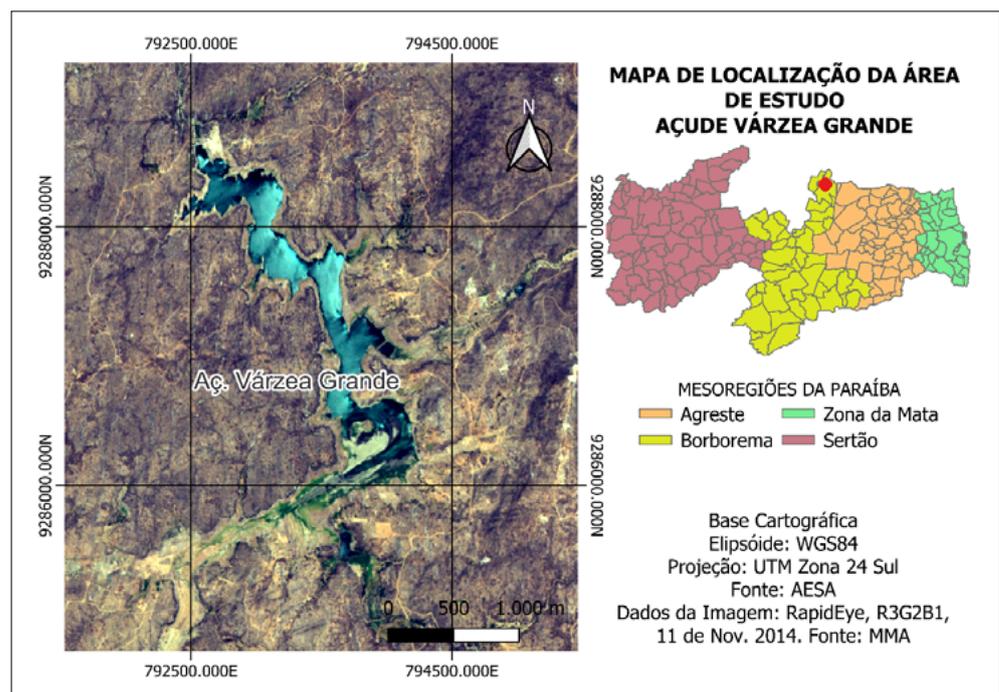
Com relação aos dados e a seu processamento, foram utilizados: i) imagens orbitais dos satélites ResourceSat 1 e 2, CBERS 4A e RapidEye; ii) dados vetoriais oriundos da base de shps (*shapefiles*) da AESA.

De maneira geral, para a execução deste trabalho, os procedimentos metodológicos contemplaram as seguintes atividades:

3.1 Delimitação da área de estudo

A área de estudo da pesquisa compreende o açude Várzea Grande (Figura 1), localizado no município de Picuí, na mesorregião do Planalto do Borborema, estado da Paraíba, que apresenta localização geográfica aproximada nas coordenadas 6°26'44"S e 36°20'55"W e dista aproximadamente 7,5 km da sede do município. O açude possui capacidade máxima de 21.532.659,00 m³, estando, em 2022, com 64.728,00 m³ de volume (AESA, 2022). Teve sua construção iniciada no ano de 1993 e concluída em 1995, sendo formado pelo represamento da água do rio Picuí, que é um afluente do rio Seridó, o principal rio da sub-bacia. Abastece o município de Picuí e, eventualmente, o de Frei Martinho, com a distribuição de 1.056 m³ de água tratada por dia (Azevedo, 2011), sendo um dos responsáveis pelo abastecimento hídrico do município e destacando-se pela importância local, por se tratar de um reservatório de abastecimento público. Desse modo, o açude Várzea Grande possui importância ímpar para a região, sendo indispensável que estudos contínuos sejam desenvolvidos.

Figura 1 ►
Localização da área de estudo.
Fonte: AESA (2022) e Embrapa (2019)



A geomorfologia da bacia encontra-se bastante caracterizada por suas terras se conformarem na escarpa oriental do Planalto da Borborema, entre a Depressão Sublitorânea e as áreas Pediplanadas Sertanejas. Observam-se altitudes maiores que 600 m, relevo fortemente ondulado e montanhoso, com vales próximos às encostas, cujas profundidades variam de 100 m a 200 m.

3.2 Processo de aquisição de imagens RapidEye, CBERS e ResourceSat

As imagens utilizadas neste trabalho foram fornecidas pelo catálogo da Divisão de Geração de Imagens (DGI), que faz parte da Coordenação-Geral de Observação da Terra (CGOBT) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). As atividades da DGI concentram-se na recepção, gravação, processamento, armazenamento e distribuição de imagens e dados de satélites de sensoriamento remoto, meteorológicos e científicos, sendo essas imagens adquiridas com as bandas separadas e obtidas através de download, por meio de uma biblioteca digital (INPE, 2022).

Para efeito de delimitação temporal, optou-se pela busca por imagens em um horizonte de 10 anos contínuos, com o intuito de averiguar o comportamento do espelho d'água do açude. Foi delimitada a busca por produtos de sensoriamento remoto que atendessem a necessidade temporal estabelecida. Assim, partindo do ano de 2012 até o ano de 2021, foram pesquisadas, por meio do catálogo de imagens, diversas plataformas orbitais.

Outra necessidade da pesquisa, além da cobertura temporal, consistia em que os produtos pesquisados tivessem resolução espacial e espectral compatíveis com os objetivos do trabalho. Das plataformas disponíveis gratuitamente, foram pesquisados produtos oriundos dos satélites CBERS 4A, ResourceSat 1 e 2, Landsat e RapidEye, que atendiam aos requisitos iniciais elencados, possuindo resolução espacial compatível com a disponibilidade de imagens na banda espectral posicionada na região do infravermelho, amplamente utilizada na identificação de corpos d'água.

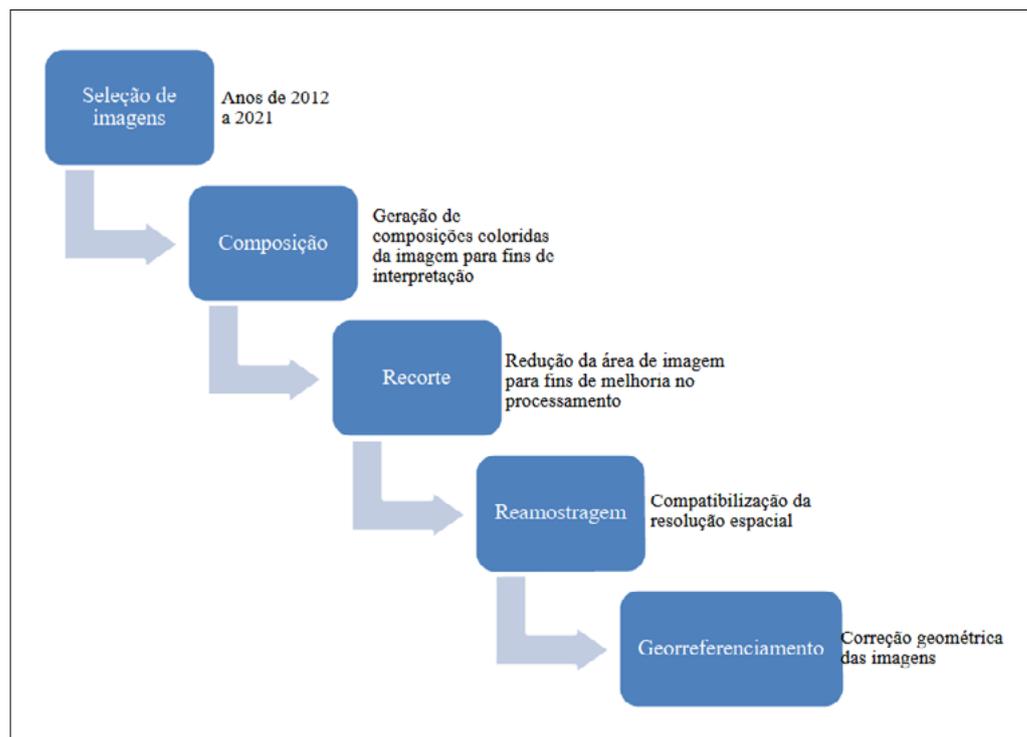
3.3 Pré-processamento das imagens

As etapas descritas a seguir correspondem ao fluxograma exibido na Figura 2 (próxima página). São apresentados, neste estudo, o processo de seleção de cenas, o processo de composição colorida para fins de interpretação visual, o processo de recorte para redução do tempo de processamento das cenas e a reamostragem dos pixels para compatibilização das resoluções espaciais e posterior aprimoramento geométrico para possibilitar a extração adequada das feições de interesse.

Figura 2 ▶

Fluxograma do pré-processamento das imagens a serem utilizadas na pesquisa.

Fonte: elaborada pelos autores



Inicialmente, a seleção de imagens culminou com a relação apresentada no Quadro 1, com suas respectivas plataformas e datas de aquisição.

Quadro 1 ▶

Imagens selecionadas considerando o ano e a ausência de cobertura de nuvens sobre a área em estudo.

Fonte: dados da pesquisa

Plataforma	Ano de aquisição	Sensor	Resolução espacial (m)	Resolução temporal (dias)
ResourceSat 1	2012	LISS3	23,5	24
ResourceSat 1	2013	LISS3	23,5	24
RapidEye	2014	REIS	5,0	5
ResourceSat 2	2015	LISS3	23,5	24
ResourceSat 2	2016	LISS3	23,5	24
ResourceSat 2	2017	LISS3	23,5	24
ResourceSat 2	2018	LISS3	23,5	24
ResourceSat 2	2019	LISS3	23,5	24
ResourceSat 2	2020	LISS3	23,5	24
CBERS4A	2021	MUX	16,5	31

Como pode ser observado no Quadro 1, quatro diferentes satélites foram utilizados no trabalho, demandando assim etapas adicionais que antecedem a extração dos limites do açude, uma vez que cada uma das plataformas acessadas possui uma resolução espacial distinta para os sensores utilizados.

Para cada imagem obtida foi necessário realizar, inicialmente, a composição de bandas em um único arquivo .tiff. Deve ser destacado que cada produto de

sensoriamento remoto dos satélites listados é composto por várias imagens de uma única área. Por exemplo, o produto RapidEye consiste em cinco imagens de uma mesma área, correspondentes a uma banda de imageamento cada. Nesse caso, as bandas Azul (440 nm – 510 nm), Verde (520 nm - 590 nm), Vermelho (630 nm – 690 nm), Red Edge (690 nm – 730 nm) e Infravermelho Próximo (760 nm – 880 nm) foram “empilhadas” em um único arquivo, de modo a facilitar as etapas posteriores. Uma vez realizada a composição de bandas, etapas como o georreferenciamento são mais bem realizadas, uma vez que, nesse caso, cinco imagens seriam processadas por vez.

No caso das imagens IRS-1e IRS-2, cada cena composta é o resultado do “empilhamento” das bandas B2 (520 nm – 590 nm), B3 (620 nm – 680 nm), B4 (770 nm – 860 nm) e B5 (1550 nm – 1700 nm). No caso do CBERS4A, cada cena composta conta com as bandas Azul (450 nm – 520 nm), Verde (520 nm – 590 nm), Vermelho (630 nm – 690 nm) e Infravermelho Próximo (770 nm – 890 nm).

Após a composição, foi realizado o recorte de todas as cenas de modo a reduzir o tamanho dos arquivos e delimitar melhor a área de interesse. Tal procedimento representa redução no tempo de processamento das imagens, além de proporcionar diferentes visões acerca de um mesmo alvo com base no seu comportamento espectral.

Após o recorte, as imagens foram reamostradas. A reamostragem consiste na alteração do tamanho do pixel da imagem sem perda significativa da informação. Tal procedimento se faz necessário porque as imagens possuem resolução espacial distinta, o que, em um processo de vetorização manual ou mesmo de extração automática de feições, culminaria em diferenças significativas nos vetores gerados, acarretando erros de natureza geométrica (Gonzalez; Woods, 2010).

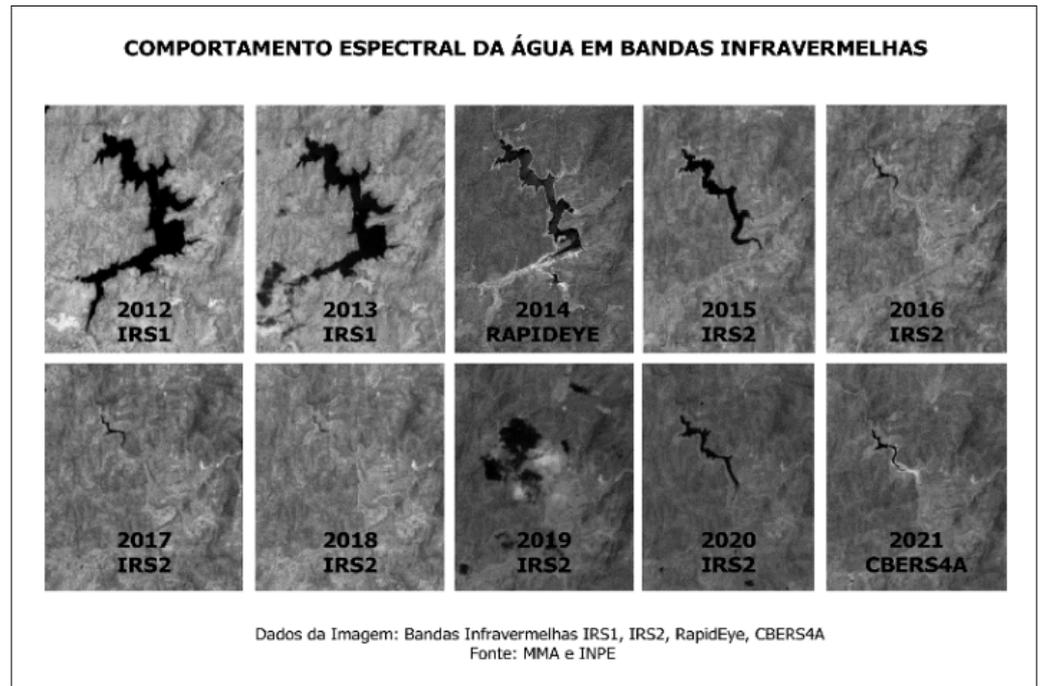
Em seguida, com todo o conjunto de imagens composto, recortado e reamostrado, procedeu-se ao georreferenciamento das cenas. Para esse procedimento foi utilizada a técnica de georreferenciamento de imagem com base em outra imagem já georreferenciada. Para isso são identificados pontos homólogos na imagem a ser georreferenciada, bem como na imagem de referência, e aplica-se a transformação polinomial de 1ª ordem (D’Alge, 2013). Assim, as imagens selecionadas foram preparadas para a próxima etapa.

3.4 Extração das fronteiras dos espelhos d’água

Para realizar a extração dos limites do espelho d’água do reservatório, realizou-se a vetorização manual utilizando como referência as imagens na região do infravermelho próximo, na qual a água possui baixa reflexão espectral e, por conseguinte, alta absorção de fluxo radiante incidente, aparecendo nas imagens como regiões de nível de cinza muito escuro, conforme Jensen (2009), como é mostrado na Figura 3 (próxima página). Cada uma das imagens foi utilizada para a construção de um vetor correspondente aos limites do espelho d’água na data de aquisição da imagem. Os vetores foram sobrepostos, tiveram suas áreas calculadas e foram organizados por ordem de área ocupada em m² para uma melhor visualização.

Figura 3 ►

Identificação do espelho d'água do açude Várzea Grande, por meio das bandas infravermelhas em diversos sensores.
 Fonte: Brasil (2022) e INPE (2022)

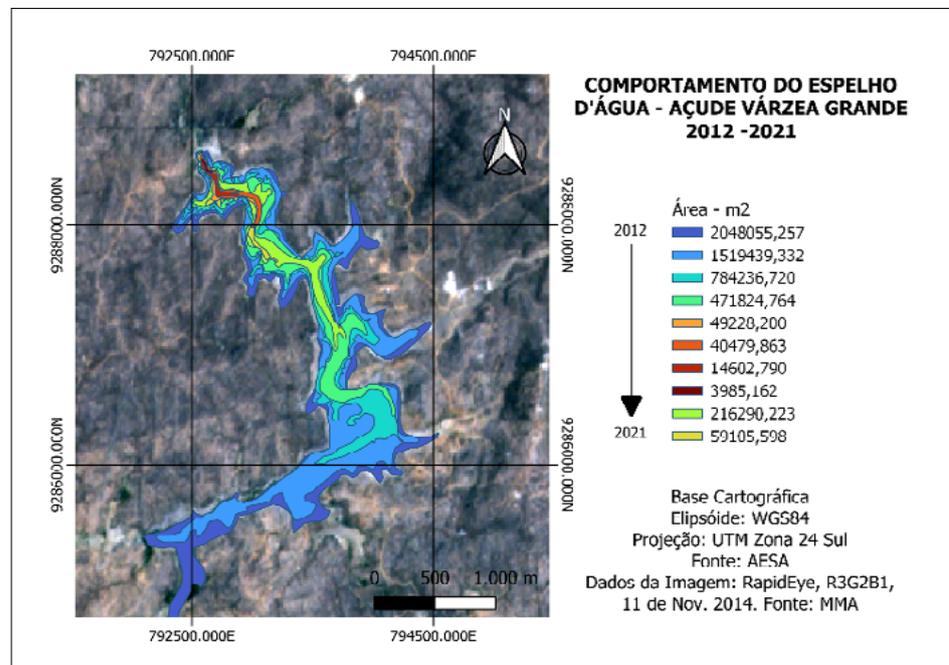


4 Resultados e discussão

Após o processamento, cada vetor foi agrupado e organizado, tendo em vista a área calculada e o ano de obtenção, como mostra a Figura 4.

Figura 4 ►

Mapa do comportamento do espelho d'água do açude Várzea Grande obtido por meio de sensoriamento remoto.
 Fonte: dados da pesquisa



Como se pode observar, o espelho d'água sofreu visíveis variações ao longo dos anos. De 2012 a 2019, a área inundada do reservatório foi sendo reduzida, chegando a menos de 1 hectare inundado.

A Tabela 1 traz cada ano observado, com a área do espelho d'água mensurada e o volume oficial registrado.

Tabela 1 ▶

Comparação dos resultados obtidos da área do espelho d'água com dados de volume e percentuais de capacidade obtidos pela AESA.
Fonte: AESA (2022)

Ano de observação	Área do espelho (m ²)	Volume (m ³)	Volume (%)
2012	2.048.055,257	10.523.235,60	48,87
2013	1.519.439,332	9.042.967,30	42
2014	784.236,760	2.613.132,56	12,14
2015	471.824,764	1.396.201,70	6,48
2016	49.228,200	117.103,68	0,54
2017	40.479,863	95.141,44	0,44
2018	14.602,790	29.021,12	0,13
2019	3.985,162	830,25	0
2020	216.290,223	444.580,10	2,06
2021	59.105,598	127.129,92	0,59

Em cada ano pesquisado, o espelho d'água do reservatório apresentou um comportamento peculiar. No ano de 2012, segundo dados da AESA, em data próxima à data de aquisição da imagem, esse açude registrava cerca de 48,87% (10.523.235,60 m³) de sua capacidade, também com o registro da maior área inundada da série histórica, com cerca de 2.048.055,257 m². No ano de 2013, houve uma redução na capacidade ocupada: o reservatório apresentava 42% (9.042.967,30 m³) de sua capacidade em data próxima à aquisição da imagem. A pesquisa aferiu nesse ano uma área de cerca de 1.519.439,332 m², acompanhando o registro de redução. No ano de 2014, os dados de registro oficiais apresentaram uma redução significativa no estado da capacidade do açude em questão, com cerca de 12,14% (2.613.132,56 m³) de seu total possível. O estudo em pauta registrou também a tendência de redução, tendo a área inundada cerca de 784.236,760 m².

Continuando, no ano de 2015, a AESA registrou o Várzea Grande com 6,48% (1.396.201,70 m³) de sua capacidade e, em data próxima, a pesquisa apontou uma redução ainda maior do espelho d'água, com uma área inundada de 471.824,764 m². Em 2016, 0,54% (117.103,68 m³) foi o valor registrado pela AESA para o mês de novembro, data próxima da aquisição da imagem utilizada no estudo, que apontou uma redução de área inundada, apresentando 49.228,200 m² naquela ocasião. Em 2017, a área inundada aferida pelo estudo foi de 40.479,863m², para uma capacidade de 0,44% (95.141,44 m³) apresentada pela AESA. Em 2018, a capacidade de 0,13% (29.021,12 m³) foi registrada, e uma imagem em data próxima registrou 14.602,790 m² de área inundada. E em 2019, o reservatório chegou a sua menor área inundada da série estudada, 3.985,162 m², e os registros oficiais apontaram para 0% da capacidade, com cerca de 830,25 m³. Em julho de 2020, este estudo apontou uma recuperação na área inundada, registrando 216.290,223 m², quando a AESA registrava um aumento da capacidade para 2,06% (444.580,10 m³). Por fim, em 2021, uma nova redução na área inundada afetou o reservatório, deixando-o com cerca de 59.105,598 m², quando a AESA registrou 0,59% (127.129,92 m³).

Os resultados apresentados são coerentes com o regime de chuvas da região, que no período estudado enfrentou uma seca severa, situação amenizada nos últimos dois anos da série. Fenômenos como a evapotranspiração elevada em regiões semiáridas podem explicar perda de área inundada de maneira acentuada.

5 Conclusão

O estudo de recursos hídricos é de fundamental importância, principalmente nas regiões onde esse recurso é escasso e onde são necessárias políticas públicas eficientes para a gestão adequada de um bem tão precioso como a água.

Para a região do município de Picuí, na Paraíba, entender os processos climáticos sazonais, que culminam num aumento ou diminuição da disponibilidade de águas de superfície, requer um olhar sistêmico e acurado com o fim de perceber as potencialidades das tecnologias emergentes.

O uso do sensoriamento remoto com a finalidade de monitorar o comportamento de um reservatório tem demonstrado possuir um grande potencial. Neste estudo, foram abordadas técnicas introdutórias, de maneira que a continuidade dos estudos, implementando métodos consagrados, bem como métodos inovadores associados à tecnologia de processamento de imagens, torna-se possível e deve ser estimulada.

Avalia-se que as dificuldades na obtenção das imagens constituem o maior entrave no uso do sensoriamento remoto orbital. Mesmo pesquisando em um horizonte de 10 anos, foram necessárias múltiplas plataformas de satélites para que o resultado fosse obtido. Em algumas situações dentro de um período de um ano, não havia imagens disponíveis que estivessem livres de nuvens. Dessa forma, há um verdadeiro vazio de dados orbitais, o que dificultaria a implementação em nível organizacional, considerando-se as plataformas de imagens disponibilizadas gratuitamente em nosso país.

Outra dificuldade é a ausência de dados topográficos compatíveis com a resolução das imagens apresentadas em nível reamostrado, o que dificulta o cálculo do volume dos reservatórios de maneira satisfatória e que possibilitasse a comparação com dados oficiais.

Entretanto, há um vislumbre da utilização da ferramenta em escalas governamental e privada, erguidas as condições de melhorias tecnológicas que possibilitem uma maior cobertura de imagens em um período menor.

Por fim, sugere-se a continuidade da pesquisa realizada, em busca de parâmetros mais bem acurados de extração de feições. A curva cota-volume já foi utilizada em outros trabalhos (Abreu; Maillard, 2016) e pode contribuir para uma melhor comparação do espelho de água gerado, caso seja disponibilizada. Os dados de sensores ativos que venham a ser disponibilizados possibilitariam a realização do cálculo de volume aproximado, que seria, assim, obtido de maneira remota. O desdobramento desta pesquisa para outras áreas do conhecimento é possível, uma vez que o elemento espaço-temporal, presente no trabalho, expande o poder de análise e compreensão da dinâmica hídrica da região, sendo a compreensão dessa dinâmica fundamental para tomadas de decisão. Os resultados obtidos satisfazem os objetivos iniciais do trabalho proposto, abrindo caminho para a continuidade das pesquisas relacionadas a esse tema.

Financiamento

Esta pesquisa não recebeu financiamento externo.

Conflito de interesses

Os autores declaram não haver conflitos de interesses relacionados aos resultados apresentados na pesquisa.

Referências

ABREU, L. G. A. C.; MAILLARD, P. Determinação de curva “cota x área” do reservatório da UHE Três Marias com o uso de radar altimétrico e imagens orbitais. *In*: SIMPÓSIO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO, 1., 2016, Juazeiro. **Anais** [...]. Petrolina: Comitê do Velho Chico, 2016. Disponível em: <https://cdn.agenciapeixe vivo.org.br/media/2019/06/Determinação-de-curva-cota-x-aerea-do-reservatório-da-UHE-Três-Marias-com-o-uso-de-radar-altimétrico-e-imagens-orbitais.pdf>. Acesso em: 9 set. 2022.

AESA – AGÊNCIA EXECUTIVA DE GESTÃO DAS ÁGUAS. **Volume dos açudes**. 2022. Disponível em: <http://www.aesa.pb.gov.br/aesa-website/monitoramento/ultimos-volumes>. Acesso em: 20 fev. 2022.

ALEXANDRE, F. S.; RAMOS, R. P. S.; COSTA, S. O. S.; LIMA, C. E. S.; DEUS, R. A. S. G.; OLIVEIRA, G. F.; SOUZA, L. R.; SILVA NETO, J. B.; SILVA, S. A.; BARBOSA, L. C. S.; GOLDFARB, M. C.; GOMES, D. D. M. Análise morfométrica da bacia hidrográfica do alto curso do rio Mundaú – PE/AL com base em MDE – SRTM. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 19., 2019, Santos. **Anais** [...]. Santos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2019. Disponível em: <http://marte2.sid.inpe.br/rep/sid.inpe.br/marte2/2019/09.09.16.20>. Acesso em: 6 set. 2022.

ARAÚJO, M. H. M. C. **Integração de dados espaciais para elaboração de mapas de risco de deslizamento de encostas**. 2014. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2014. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/10745>. Acesso em: 9 set. 2022.

AZEVEDO, D. C. F. **Diagnóstico da percepção ambiental no açude Várzea Grande – Picuí/PB**. 2011. 104 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Naturais) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2011. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/2142>. Acesso em: 13 set. 2022.

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*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 23., 2019, Foz do Iguaçu. **Anais** [...]. Foz do Iguaçu: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2019a. Disponível em: <http://mtc-m21b.sid.inpe.br/rep/sid.inpe.br/mtc-m21b/2019/12.13.11.19>. Acesso em: 20 jan. 2022.

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**, v. 14, n. 4, p. 2220-2241, 2021. DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v14.4.p2220-2241>.

BARBOSA, A. H. S.; CUELLAR, M. D. Z.; MOREIRA, M. M.; ARRAES, K. A.; SILVA, C. S. P. Sensoriamento remoto aplicado a análise dos espelhos d'água dos principais reservatórios do Rio Grande do Norte. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 19., 2019, Santos. **Anais [...]**. Santos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2019b. Disponível em: <https://proceedings.science/sbsr-2019/papers/sensoriamento-remoto-aplicado-a-analise-dos-espelhos-d-agua-dos-principais-reservatorios-do-rio-grande-do-norte>. Acesso em: 9 set. 2022.

BORGES, G. M.; PACHÊCO, A. P.; SANTOS, F. K. S. Sensoriamento remoto: avanços e perspectivas. **Revista de Geografia**, v. 32, n. 2, p. 267-292, 2015. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/revistageografia/article/view/229116>. Acesso em: 8 set. 2022.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Geo Catálogo MMA**. 2022. Disponível em: <http://geocatalogo.mma.gov.br/>. Acesso em: 5 set. 2022.

CABRAL, J. B. P.; FERNANDES, L. A.; BECEGATO, V. A.; SILVA, S. A. Caracterização geoambiental do reservatório de Cachoeira Dourada – GO/MG. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 10., Rio de Janeiro, 2003. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2003.

COLLISCHONN, B.; CLARKE, R. T. Estimativa e incerteza de curvas cota-volume por meio de sensoriamento remoto. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos (RBRH)**, v. 21, n. 4, p. 719-727, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/2318-0331.011616022>.

D'ALGE, J. C. L. Cartografia para Geoprocessamento. In: CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M. V. (org.). **Introdução à Ciência da Geoinformação**. São José dos Campos: INPE, 2013. Não paginado. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/>. Acesso em: 29 abr. 2022.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **CBERS**: China-Brazil Earth Resources Satellite ou Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres. 2020. Disponível em: <https://www.embrapa.br/satelites-de-monitoramento/missoes/cbers>. Acesso em: 2 dez. 2021.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **RapidEye**. 2019. Disponível em: <https://www.embrapa.br/satelites-de-monitoramento/missoes/rapideye>. Acesso em: 8 set. 2022.

FLORENZANO, T. G. **Iniciação em sensoriamento remoto**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

GALO, M. L. B. T.; VELINI, E. D.; TRINDADE, M. L. B.; SANTOS, S. C. A. Uso do sensoriamento remoto orbital no monitoramento da dispersão de macrófitas nos reservatórios do complexo Tietê. **Planta Daninha**, Viçosa, v. 20, n. especial, p. 7-20, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-83582002000400002>.

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. **Processamento digital de imagens**. São Paulo: Prentice Hall, 2010.

LEITE, J. C.; ZOUAIN, R. N. A. Aplicação de técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento como apoio a estudos geológicos e geotécnicos para gestão ambiental do município de Três Cachoeiras, Litoral Norte do RS, Brasil. **Geotecnia**, Lisboa, n. 118, p. 89-113, 2010. Disponível em: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/957259>. Acesso em: 12 maio 2021.

INPE – INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Catálogo de Imagens**. 2022. Disponível em: <http://www.dgi.inpe.br/catalogo/>. Acesso em: 5 set. 2022.

INPE – INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **ResourceSat**. 2020. Disponível em: <http://www.dgi.inpe.br/documentacao/satelites/resourcesat>. Acesso em: 10 out. 2021.

INPE – INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Sobre o CBERS**. 2018. Disponível em: <http://www.cbbers.inpe.br/sobre/index.php>. Acesso em: 8 set. 2022.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. São José dos Campos: Parêntese, 2009. 598 p.

LIU, W. T. H. **Aplicações de sensoriamento remoto**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. 4. ed. São Paulo: Blucher, 2010.

PEKEL, J.-F.; COTTAN A.; GORELICK, N.; BELWARD, A. S. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. **Nature**, v. 540, p. 418-422, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature20584>.

SOUZA FILHO, P. W. M.; SILVA, C. G.; MIRANDA, F. P.; BORGES, H. V. Sensibilidade ambiental ao derramamento de óleo na zona costeira e marinha amazônica: reconhecimento, princípios e aplicações. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 27, supl. 1, p. 5-6, 2009. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbg/a/KSsqjwNgDdJ3cYNw9jcLbntz/>. Acesso em: 22 mar. 2024.

STROKES, C. R. Identification and mapping of paleo-ice stream geomorphology from satellite imagery: implications for ice stream functioning and ice sheet dynamics. **International Journal of Remote Sensing**. v. 23, n. 8, p. 1557-1563, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1080/01431160110107815>.

TANGDAMRONGSUB, N.; HAN, S.-C.; JASINSKI, M. F.; SPRLÁK, M. Quantifying water storage change and land subsidence induced by reservoir impoundment using GRACE, LANDSAT, and GPS data. **Remote Sensing of Environment**, v. 233, 111385, 2019. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111385>.

WARREN, M. S.; TEIXEIRA, A. H. C.; RODRIGUES, L. N.; HERNANDEZ, F. B. T. Utilização do sensoriamento remoto termal na gestão de recursos hídricos. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 7, n. 1, p. 65-82, 2014. DOI: <https://doi.org/10.5935/1984-2295.20140002>.

YAN, W. Y.; SHAKER, A.; LAROCQUE, P. E. Scan Line Intensity-Elevation Ratio (SLIER): an airborne LiDAR ratio index for automatic water surface mapping. **Remote Sensing**, v. 11, n. 7, 814, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/rs11070814>.

YAO, F.; WANG, J.; WANG, C.; CRÉTAUX, J.-F. Constructing long-term high-frequency time series of global lake and reservoir areas using Landsat imagery. **Remote Sensing of Environment**, v. 232, 111210, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111210>.

ZANOTTA, D. C.; FERREIRA, M. P.; ZORTEA, M. **Processamento de imagens de satélite**. São Paulo: Oficina de Textos, 2019.