



ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: www.ufpe.br/rbgfe



Proposta e avaliação de índices para delimitar e mapear corpos d'água utilizando imagens do satélite LANDSAT 8

Gabriel Henrique de Almeida Pereira¹, Marciel Lohmann², Ronaldo Ferreira Maganhotto³

¹ Engenheiro Ambiental e Doutorando na Universidade Federal do Paraná (UFPR) – pereira.gha@hotmail.com (autor correspondente). ² Professor e Pesquisador na Universidade Estadual de Londrina (UEL) – marciel_lohmann@yahoo.com.br. ³ Professor e Pesquisador na Universidade Estadual do Centro Oeste (UNICENTRO) – ronaldomaganhotto@gmail.com.

Artigo recebido em 20/04/2016 e aceito em 25/11/2016

RESUMO

Este artigo teve como objetivo principal propor três novos Índices da Diferença Normalizada de Água e compará-los aos índices existentes, para delimitar e mapear corpos d'água utilizando imagens do satélite Landsat 8. A área de estudo escolhida foi um braço do reservatório da usina hidrelétrica de Itaipu. Foram utilizadas quatro imagens do satélite Landsat 8 do ano de 2015, sobre as quais índices já conhecidos na literatura foram calculados. Em função do Landsat 8 possuir uma nova banda chamada *Coastal/Aerosol* projetada especificamente para os recursos hídricos e investigação da zona costeira, foram propostos três novos índices utilizando esta nova banda e as bandas do infravermelho, sendo calculados e comparados. Os resultados mostraram que todos os oito índices foram capazes de identificar o corpo d'água referente ao braço do reservatório, sendo que entre os três novos índices propostos que utilizam a banda *Coastal/Aerosol*, o que obteve melhor resultado foi o CAMIR, que usa juntamente a banda do infravermelho médio. Esta técnica torna-se uma ferramenta importante para os gestores de bacias hidrográficas pois permite monitorar os recursos hídricos sob a ótica da dinâmica espacial e temporal de maneira automática, com aplicações claras para monitoramento de sedimentos, algas e plantas aquáticas bem como o mapeamento de áreas inundáveis e de risco à inundação.

Palavras-chave: NDWI; CAMIR; Itaipu; Reservatório.

Proposal and evaluation of indices to delimit and map water bodies using images from LANDSAT 8 satellite

ABSTRACT

This article aimed to propose three new water indexes to detect and map water bodies and compare these indexes to already known indexes using images from Landsat 8. The study area was a part of the Itaipu reservoir. There were used four Landsat 8's images from 2015 on which indexes were calculated. Landsat 8 has a new band called Coastal/Aerosol and designed specifically for water resources and coastal zone research. Three new indices using this new band and infrared bands were proposed, calculated and compared with other indexes. The results showed that all eight indexes studied were able to identify the water body. About the three proposed new indexes the best was the CAMIR that uses the Coastal/Aerosol and the Middle Infrared band. These techniques becomes an important tool for manager watersheds because they allow monitoring the water resources from the perspective of spatial and temporal dynamics automatically, with clear applications for monitoring sediments, algae and aquatic plants as well as the flood risk areas.

Keywords: NDWI; CAMIR; Itaipu; Reservoir.

Introdução

O uso de técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento para apoio aos estudos hidrológicos torna-se cada dia mais comum, principalmente com a utilização de imagens orbitais.

Tendo como premissa que os valores de reflectância da água são diferentes de outros usos e coberturas do solo, é possível utilizar tais imagens para o mapeamento e delimitação de corpos d'água,

monitoramento da qualidade da água, identificação de sedimentos e detecção de algas e plantas aquáticas, entre outros.

Dessa forma, a utilização de imagens orbitais para realização destes estudos, permite maior rapidez na geração de resultados, diminuição de custos, bem como o mapeamento e monitoramento de grandes áreas ou mesmo de áreas remotas em que o acesso é dificultado. Além

disso, torna-se possível analisar as relações entre os corpos d'água e os outros elementos ou dinâmicas de uso da terra presentes na área ou bacia hidrográfica estudada.

Especificamente para mapeamento de corpos d'água, sejam eles de áreas inundadas em função da chuva, área de produção de arroz irrigado ou ainda de reservatórios de usinas hidrelétricas ou represas de abastecimento público, dados de sensoriamento remoto são comumente utilizados e diversos estudos tem explorado tal temática (Wang et al., 2002; Xu, 2006; Serpico et al., 2012; Memon et al., 2015).

Geralmente o mapeamento de corpos d'água pode ser abordado de duas formas: pela classificação automática de imagens ou pela delimitação manual do corpo d'água. Utilizando a primeira abordagem, destacam-se produtos obtidos por técnicas de processamento digital de imagens de sensores ópticos, por exemplo, os produtos dos sensores a bordo do satélite Landsat (Xu, 2006), por processamento de dados de radar, que operam na região espectral do micro-ondas, como imagens do satélite Radarsat (Marinho et al., 2012), ou ainda utilizando-se de índices gerados a partir do processamento e combinação de duas ou mais bandas do espectro do visível e infravermelho.

De acordo com Li et al. (2013), técnicas de processamento digital de imagens obtidas por sensores ópticos para mapeamento de corpos d'água são baseadas em algoritmos de classificação que buscam se aproveitar do comportamento espectral da água, seja pela análise mono ou multi bandas. Análises multi bandas têm sido indicados para discriminação de corpos d'água devido a sua eficiência na separação das classes (água e outros elementos contidos na imagem) através de índice espectral.

Dentre os métodos e técnicas de processamento de imagens de sensoriamento remoto com vistas a identificação de corpos d'água, destaca-se o Índice da Diferença Normalizada de Água (*Normalized Difference Water Index* – NDWI), um método desenvolvido por McFeeters (1996) com o intuito de delinear feições presentes no ambiente aquático, e realçar a presença das mesmas nas imagens.

Este índice derivou do NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), o qual se baseia na assinatura espectral característica de uma vegetação verde e sadia que mostra um evidente

contraste entre a combinação das bandas do vermelho e do infravermelho próximo. O NDWI, contudo, é obtido através de combinações das bandas espectrais do verde e do infravermelho próximo.

A utilização desse índice permite uma melhor visualização das áreas com alto teor de umidade e corpos de água. Segundo Gao (1996), o NDWI varia quase linearmente com a espessura da lâmina da água. Dessa forma, esse índice tem se destacado no monitoramento do comportamento hídrico.

A literatura especializada apresenta uma vasta quantidade de índices para detecção de água. Entretanto, estes índices foram desenvolvidos baseados em outros sensores, com diferentes características das presentes atualmente no Landsat 8. Assim, o objetivo desse trabalho foi de propor três novos Índices de Água e compará-los aos índices existentes, para delimitar e mapear corpos d'água utilizando imagens do satélite Landsat 8.

Tal propósito torna-se relevante na medida em que é necessário monitorar o espelho d'água de determinadas áreas, como por exemplo, reservatórios de usinas hidrelétricas ou grandes açudes de abastecimento público. Este monitoramento possui relação direta com a gestão e o planejamento das bacias hidrográficas que drenam para reservatórios ou açudes, já que o manejo do uso da terra em tais bacias pode refletir em assoreamento do reservatório bem como a eutrofização do mesmo com a proliferação de algas e plantas aquáticas, produzindo prejuízos para a geração de energia ou no abastecimento público.

Material e métodos

Área de estudo

Em relação a área de estudo, foi selecionado como área teste para calcular os índices, um braço do reservatório de Itaipu (Figura 1) entre os municípios de Pato Bragado e Entre Rios do Oeste.

O reservatório de Itaipu como um todo, possui 1.350 km² de área inundada, sendo o sétimo maior do Brasil, mas dispõe do melhor índice de aproveitamento da água para produzir energia entre os grandes reservatórios brasileiros. O reservatório localiza-se na bacia hidrográfica do rio Paraná que, a partir da foz do rio Iguaçu, passa a ser o limite natural entre Argentina e Paraguai.

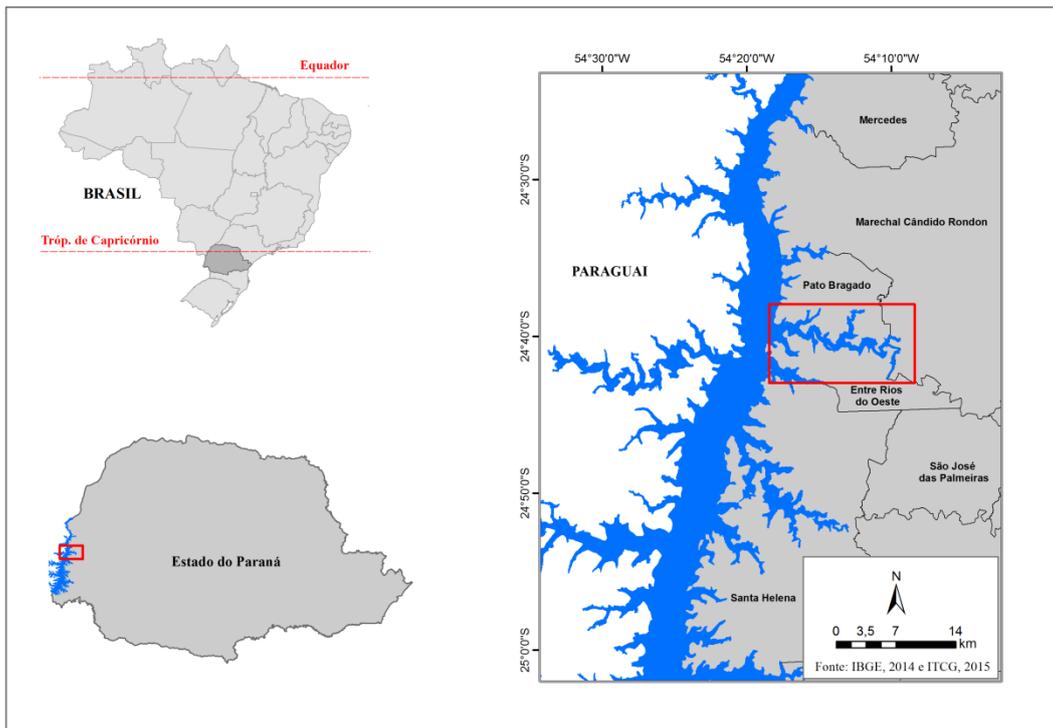


Figura 1. Mapa de localização da área de estudo.

O programa Landsat

O programa Landsat é um projeto de aquisição de imagens que se encontra ativo durante mais tempo. O programa teve seu início em 1972, com o lançamento do *Earth Resources Satellite Technology* e prossegue nos dias de hoje com o lançamento, em 2013, do Landsat 8. Os instrumentos dos satélites Landsat adquiriram milhões de imagens estando arquivadas nos Estados Unidos e nas estações ao redor do mundo, sendo um recurso único para pesquisas e aplicações em agricultura, cartografia, geologia, florestas, ordenamento do território, hidrografia, vigilância e educação.

O Landsat 8 é um satélite de observação da Terra lançado em 11 de fevereiro de 2013. É o oitavo satélite do Programa Landsat, o sétimo a atingir a órbita com sucesso. O Landsat 8 possui a bordo dois sensores, o *Operational Terra Imager* (OLI) e *Thermal Infra Red Sensor* (TIRS). Respectivamente, esses dois instrumentos coletam dados de imagem por nove faixas de ondas curtas e duas bandas térmicas de ondas longas. O Landsat 8 opera no visível, infravermelho próximo, infravermelho de ondas curtas, e espectros de infravermelho termal.

O sensor OLI coleta dados de nove bandas espectrais. Sete das nove faixas são consistentes com a *Thematic Mapper* (TM) e sensores encontrados em anteriores satélites Landsat *Enhanced Thematic Mapper Plus* (ETM+), que

prevê a compatibilidade com os dados históricos do Landsat, além de melhorar as capacidades de medição. Duas novas bandas espectrais serão coletadas, uma faixa *Coastal Blue/Aerosol* profunda e uma banda de Infravermelho Cirrus, permitindo aos cientistas medir a qualidade da água e melhorar a detecção de altas nuvens finas.

Além disso, os sensores presentes no satélite Landsat 8 fornecem imagens de moderada resolução espacial - de 15 metros a 100 metros - da superfície terrestre do planeta e regiões polares. A resolução radiométrica das imagens obtidas a partir do Landsat 8 é de 16 bits.

Estrutura

O trabalho foi estruturado em quatro etapas: a) Aquisição das imagens; b) Cálculo dos Índices de Água; c) Proposta de um novo índice; d) Comparação e validação dos índices.

Aquisição das imagens

Foram utilizadas 4 imagens do satélite Landsat 8, órbita ponto 224/077 das seguintes datas: 18/03/2015; 05/05/2015; 06/06/2015 e 22/06/2015. Tais imagens foram adquiridas de forma gratuita na página do *United States Geological Survey* (USGS) no endereço <http://glovis.usgs.gov/>.

Cálculo dos índices de água

Dentre os métodos e técnicas de processamento de imagens de sensoriamento remoto com vistas à análise hidrológica, destaca-se o Índice da Diferença Normalizada de Água (*Normalized Difference Water Index* – NDWI), um método desenvolvido por McFeeters (1996) com o intuito de delinear feições presentes no ambiente aquático, e realçar a presença das mesmas nas imagens.

Adotando o formato do Índice de Diferença Normalizada de Vegetação (NDVI), McFeeters (1996) desenvolveu o NDWI, definido como:

$$NDWI = (Green - NIR) / (Green + NIR)$$

Onde *Green* e *NIR* são bandas de reflectância do verde e infravermelho próximo, respectivamente.

O valor de NDWI varia de -1 para 1. McFeeters (1996) definiu zero como o limiar. Isto é, o tipo de cobertura é a água se $NDWI \geq 0$ e não água se $NDWI \leq 0$. O NDWI proposto por McFeeters permite: (1) maximizar a reflectância típica da água usando o comprimento de onda da luz verde; (2) minimizar a baixa reflectância dos corpos de água no infravermelho próximo; e (3) realçar o contraste entre a água e a superfície terrestre proporcionada pela banda infravermelha.

O MNDWI (*Modified Normalized Difference Water Index*) foi criado a partir de uma suposição de que: sabendo que os valores (números digitais) para água na banda do infravermelho médio são ainda menores que na banda do infravermelho próximo, poderia ser mais adequado utilizar na equação do NDWI ao invés do infravermelho próximo, o infravermelho médio, de maneira a maximizar ainda mais a diferença entre as bandas. Assim, surge o NDWI modificado, expresso por:

$$MNDWI = (Green - MIR) / (Green + MIR)$$

Onde *Green* e *MIR* são bandas de reflectância do verde e infravermelho médio, respectivamente

Em 1996, Gao (1996) desenvolveu um NDWI diferente, usado para estimar a cobertura e o teor de água do dossel da vegetação. Embora o NDWI de McFeeters e Gao tenham a mesma terminologia, os conceitos dos dois NDWIs são completamente diferentes (Ji et al., 2009). O NDWI de Gao é calculado como a diferença normalizada das bandas NIR (infravermelho próximo) e MIR (infravermelho médio), ou seja, a razão entre as diferenças da refletividade do infravermelho próximo e do infravermelho médio

e a soma das mesmas. O índice é obtido conforme a seguinte equação:

$$NDWI_{GAO} = (NIR - MIR) / (NIR + MIR)$$

Onde *NIR* e *MIR* referem-se a refletância no infravermelho próximo e no infravermelho médio, ou ainda as bandas 4 e 5 do TM - Landsat 5, ou as bandas 5 e 6 do OLI - Landsat 8.

Rogers e Kearney (2004) usaram as bandas do vermelho e SWIR para produzir outro índice para a água. A fórmula é dada por:

$$RSWIR = (Red - SWIR) / (Red + SWIR)$$

Onde *Red* e *SWIR* referem-se a refletância no vermelho e as ondas curtas do infravermelho respectivamente.

Em 2006, Xu (2006) ainda propôs outro índice modificado para a equação de McFeeters (1996), em que utiliza o infravermelho de ondas curtas (SWIR) no lugar do infravermelho próximo (NIR) mais o verde. A equação ficou definida como:

$$GSWIR = (Green - SWIR) / (Green + SWIR)$$

Onde *Green* e *SWIR* referem-se a refletância no verde e as ondas curtas do infravermelho, respectivamente.

O cálculo dos diferentes índices foi realizado utilizando um programa elaborado no software MATLAB que utiliza matemática de bandas, em que as entradas foram as bandas do Landsat 8 referentes aos comprimentos de onda no vermelho, verde e infravermelhos, e as saídas foram as imagens dos índices propriamente ditos, com a extração dos corpos d'água.

De posse das imagens, foi extraído apenas o que correspondia à água e transformado para formato vetorial e calculada a calcular a área e o perímetro do polígono gerado.

Proposta de um novo índice

O sensor abordo do Landsat 8, coleta imagens em mais duas novas bandas espectrais, uma faixa *Coastal Blue/Aerosol* e uma banda de Infravermelho Cirrus.

Com a afirmação e testes por parte do Programa Landsat de que a banda *Coastal* (banda1) foi projetada especificamente para os recursos hídricos e investigação da zona costeira, teve-se como hipótese que a banda 1 poderia ser utilizada para propor um novo Índice da Diferença Normalizada de Água.

Tendo como base que os índices já amplamente discutidos em outros trabalhos

utilizam-se das bandas do vermelho, verde e infravermelhos, propôs-se que ao invés de utilizar as bandas do verde ou vermelho, utilize-se a banda *Coastal* em conjunto com as bandas do infravermelho.

Assim sendo, propôs-se três novos índices, a saber:

$$CANIR = (Coastal - NIR) / (Coastal + NIR)$$

$$CAMIR = (Coastal - MIR) / (Coastal + MIR)$$

$$CASWIR = (Coastal - SWIR) / (Coastal + SWIR)$$

Onde *Coastal* referem-se a refletância da banda 1 do Landsat 8 (0.43 – 0.45 μm), e NIR, MIR e SWIR ao infravermelho próximo, médio e de ondas curtas.

Comparação e validação dos índices

Para comparação e validação dos índices, bem como a escolha do melhor índice para extração de corpos d'água, utilizaram-se as mesmas imagens e foi feita a vetorização em tela do mesmo corpo d'água. Tal vetorização resultou em um polígono e o mesmo foi adotado como sendo a base ou "verdade de campo". Após isso, foi calculada a área desse polígono e comparado com a área calculada sobre os vetores extraídos a partir das imagens com os índices. Tal procedimento também serviu para verificação de qual ou quais índices tiveram melhores resultados.

Resultados

É importante salientar que o cálculo dos índices se deu considerando o pixel como unidade espacial (no caso da resolução espacial Landsat é

de 30m para as bandas utilizadas). Desta forma, o contorno ou limite do corpo hídricos gerados automaticamente, traz a sensação de "serrilhado" conforme o contorno do pixel. Este resultado, caso o operador tenha interesse, pode ser amenizado utilizando-se de métodos de suavização. Entretanto, como o objetivo deste trabalho se encontra justamente na verificação e comparação entre os índices, optou-se por analisar os resultados obtidos diretamente pelos índices, sem nenhum tipo de modificação.

Como referido anteriormente, os Índices de Água foram calculados para quatro imagens Landsat 8 do ano de 2015. Como exemplo dos resultados obtidos é apresentada a Figura 2, que ilustra o contorno dos polígonos de água gerados no processamento de todos os índices para a data 18/03/2015. Inicialmente, é possível destacar que todos os índices foram capazes de delimitar o braço de água como um todo, nenhum apresentando falha na detecção, ou seja, a não identificação de uma porção de água. Porém, a diferença entre os índices se deu na detecção da borda do corpo hídrico (Figura 3). Isto é perceptível ao verificar a quantidade de limites (ou cores) que delimitam o braço do reservatório.

Sob esta ótica, é possível constatar que todos os 8 índices calculados neste trabalho foram eficientes na detecção de pixels "puros", ou seja, que continham apenas informação de água no pixel. A principal diferença na detecção dos índices se encontra em pixels mistos, ou seja, pixels que se encontram em área de transição entre classes, misturando a resposta espectral de duas classes como água e vegetação, água e solo exposto ou ainda água e outro tipo qualquer de uso, por exemplo.

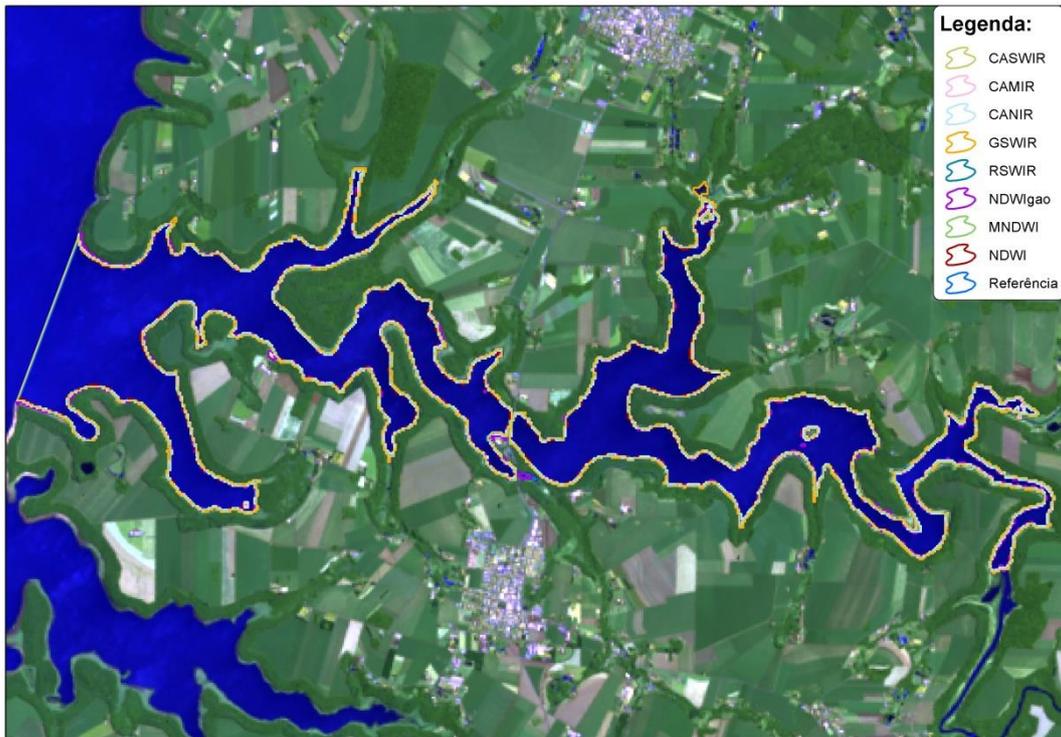


Figura 2. Resultados dos Índices da Diferença Normalizada de Água para o braço de reservatório para a imagem de 18/03/2015.

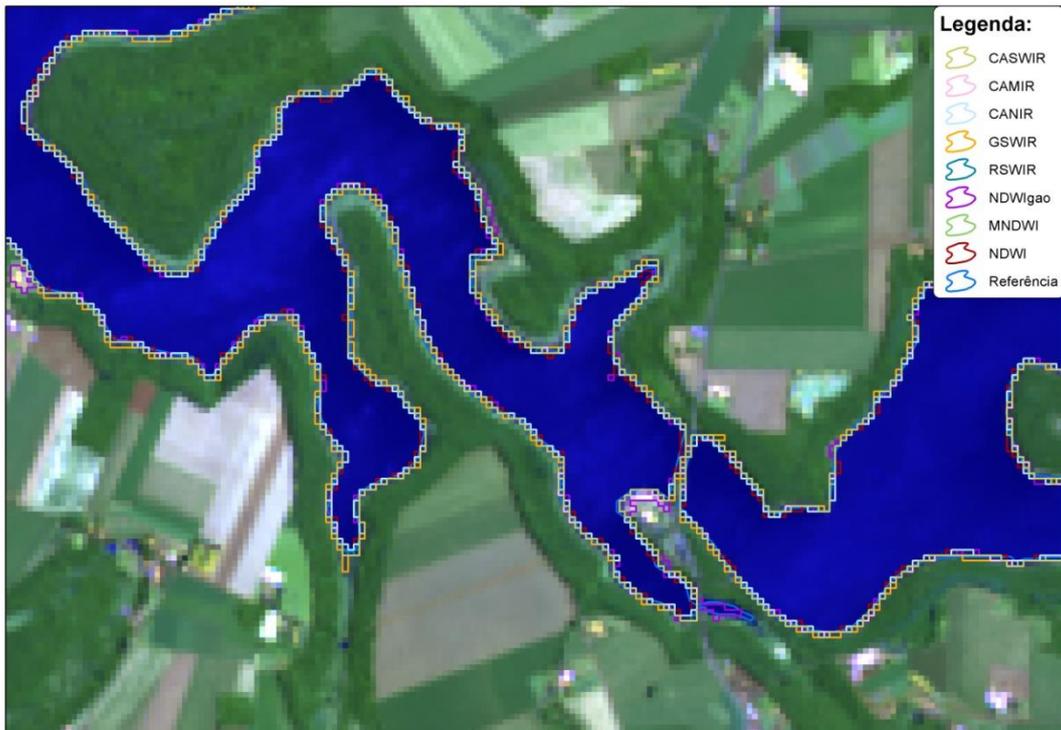


Figura 3. Detalhe do braço do reservatório para a imagem do dia 18/03/2015.

Para uma caracterização mais detalhada da detecção dos índices são apresentadas as Figuras 4 a 8. Nestas, de maneira a simplificar a leitura das informações, fez-se a comparação de apenas dois ou três índices com o limite do braço do reservatório gerado a partir da vetorização em tela e que serviu como dado de referência.

A Figura 4 apresenta a comparação entre os índices NDWI e MNDWI com o dado chamado de referência. Percebe-se, como ressaltado anteriormente, os limites "serrilhados" para os resultados dos índices, em função das bordas dos pixels. O limite de referência apresenta-se mais suave uma vez que foi resultado de digitalização.

Com relação à comparação entre os resultados dos índices, é possível verificar que o limite do corpo d'água gerado a partir do índice NDWI apresenta posição mais interna quando comparado com o MNDWI que o limite é mais externo. Tal fato é consequência da presença de pixels misturados, por exemplo, entre água e vegetação. Dessa forma, pode-se concluir que o MNDWI considera mais pixels misturados como parte integrante do corpo d'água do que o NDWI. Quando comparado com o dado de referência, é possível verificar que o limite do NDWI também tem posição mais interna, enquanto o MNDWI encontra-se externamente ao dado de referência.

A Figura 5 apresenta a comparação entre o NDWI e NDWIgao. O resultado do NDWIgao apresenta-se mais semelhante ao do NDWI, com diferença de poucos pixels classificados ou não como sendo de água. Entretanto, é possível verificar que o NDWIgao apresentou confusão com pixel de área urbana (parte inferior da imagem),

sendo esta área incluída como sendo corpo d'água e estando portanto, incongruente.

A Figura 6 ilustra a comparação entre o índice NDWI e GSWIR. É possível verificar que o índice GSWIR apresentou um limite externo maior que o NDWI. O índice GSWIR incorporou todos os pixels misturados para a classe de corpos d'água, por vezes incluindo mesmo os pixels misturados com predominância de outra classe, como a vegetação por exemplo. Sendo assim, o GSWIR incorporou os pixels misturados, mesmo com pouca quantidade de água, como sendo corpo d'água. Em relação ao dado de referência, o GSWIR ficou externo. Ainda, é possível verificar que este índice englobou pixels de vegetação na classe água, demonstrando um resultado incongruente.

A Figura 7 apresenta a comparação entre os índices NDWI, GSWIR, CAMIR e o limite de referência. É possível constatar que o índice CAMIR apresentou-se com resultado intermediário entre o NDWI e o GSWIR. Como relatado anteriormente, o GSWIR inclui pixels misturados mesmo com menor quantidade de água e o NDWI acaba por não incluir grande parte dos pixels misturados. Sendo assim, o índice CAMIR alocou pixels misturados que tivessem uma quantidade média de proporção entre água e outra classe, sem haver confusão na borda com outras classes como área urbana (pixels englobados pelo NDWIgao) ou vegetação (pixels englobados pelo GSWIR).

Os resultados do índice RSWIR foram similares aos do índice GSWIR, também apresentando classificações inadequadas de pixels de vegetação como sendo de água.



Figura 4. Comparação entre o resultado do índice NDWI, MNDWI e a Referência.

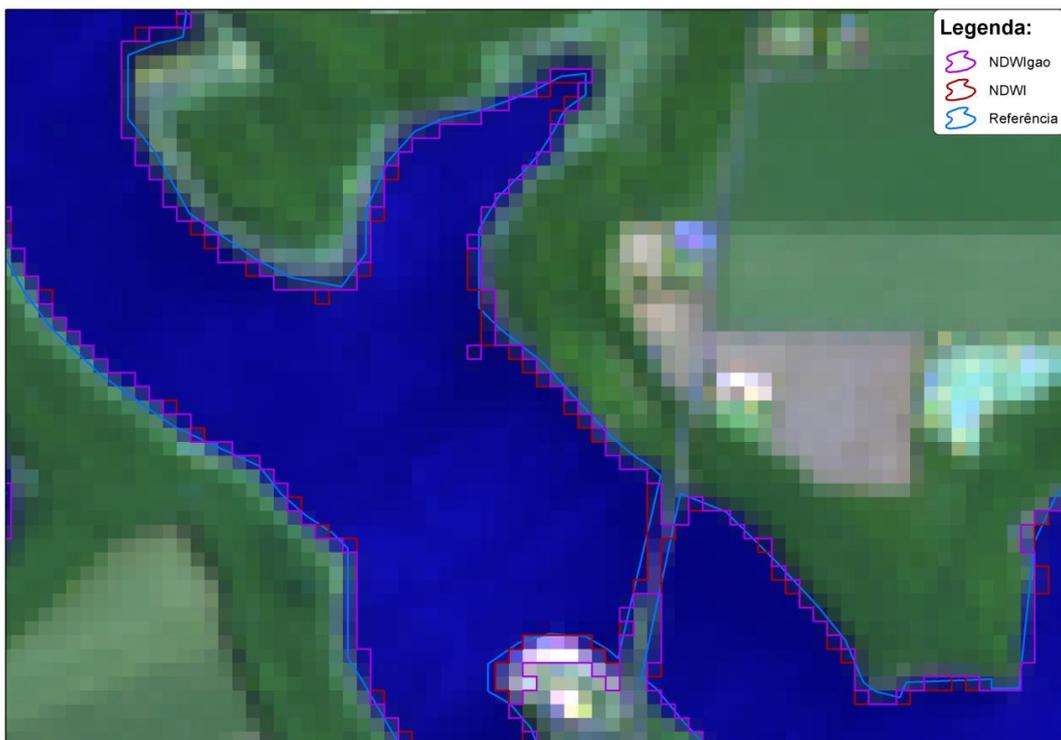


Figura 5. Comparação entre o resultado do índice NDWI, NDWIgao e a Referência.



Figura 6. Comparação entre o resultado do índice NDWI, GSWIR e a Referência.



Figura 7. Comparação entre o resultado do índice NDWI, GSWIR, CAMIR e a Referência.

Comparando apenas os novos índices propostos (CANIR, CAMIR e CASWIR), que utilizam-se da banda *Coastal*, os resultados (Figura 8) mostraram que os três índices possuem características semelhantes na delimitação de corpos d'água.

No entanto o CAMIR e o CASWIR, por utilizar a banda do infravermelho médio e de ondas curtas, respectivamente, englobam uma quantidade maior de pixels misturados, que possuem resposta de água conjuntamente com outro uso.

Como forma de quantificar as variações identificadas entre os índices (alguns incluindo em maior ou menor grau os pixels misturados de borda), fez-se a quantificação da área (em km²) gerada pelo polígono resultante do braço d'água para cada uma das datas analisadas (18/03/2015; 05/05/2015; 06/06/2015 e 22/06/2015). Os resultados da área do braço do reservatório e da área do polígono de referência calculado para as 4 datas proposta é apresentado na Figura 9.

Nesta Figura 9 é possível perceber uma tendência entre os resultados dos índices para as 4 datas. Inicialmente verifica-se que o NDWI apresentou área menor que a referência em três datas, e em apenas uma data (22/06) ficou similar. Índices como o CASWIR, CAMIR E GSWIR apresentaram áreas maiores que a referência para todas as datas. E os demais índices geraram áreas relativamente similares à referência.

Os índices que apresentaram áreas maiores foram os que utilizam-se de bandas do infravermelho médio e de ondas curtas. Tal fato pode ser explicado em função destes índices considerarem os pixels misturados (água e outro

uso) como integrante do corpo hídrico. Já os índices que utilizam-se das bandas na região do infravermelho próximo acabam por não considerar os pixels misturados como parte da classe água.

Nota-se ainda que as diferenças encontradas na área calculada para cada índice refletem a influência das bandas na região do infravermelho, sendo as bandas do visível (*Green*, *Red* e *Coastal*) pouco significativas para a diferenciação do que é ou não, água. Portanto, independente da utilização das bandas do visível, a diferenciação de água e outro tipo de uso se dá, majoritariamente, em função da utilização das bandas do infravermelho próximo, médio ou de ondas curtas.

Destaca-se ainda as variações, em termos de área, geradas por cada índice, atingindo diferenças de até 2km², ou seja, quase 10% de variação para o corpo hídrico mapeado. Como relatado anteriormente, basicamente, a diferença nos índices se encontra em pixels misturados, nos quais há a presença de água e outra classe de uso, ou seja, a borda do corpo hídrico. Com isso, quanto maior for o perímetro de um reservatório, maior quantidade de pixels de borda existirá e maior pode ser a diferença de área gerada pelos índices.

Entre os três novos índices propostos, destaca-se o índice CAMIR como o que apresentou melhores resultados. Este índice utiliza a banda do infravermelho médio e a nova banda *Coastal/Aerosol*, adicionando pixels de borda misturados de água e outra classe para a classe de corpo d'água, sem erros como a inclusão de pixels de vegetação (como no caso do GSWIR) ou pixels de área urbana (como o caso do NDWI_{gao}).



Figura 8. Comparação entre o resultado do índice NDWI, CANIR, CAMIR e CASWIR e o limite de Referência.

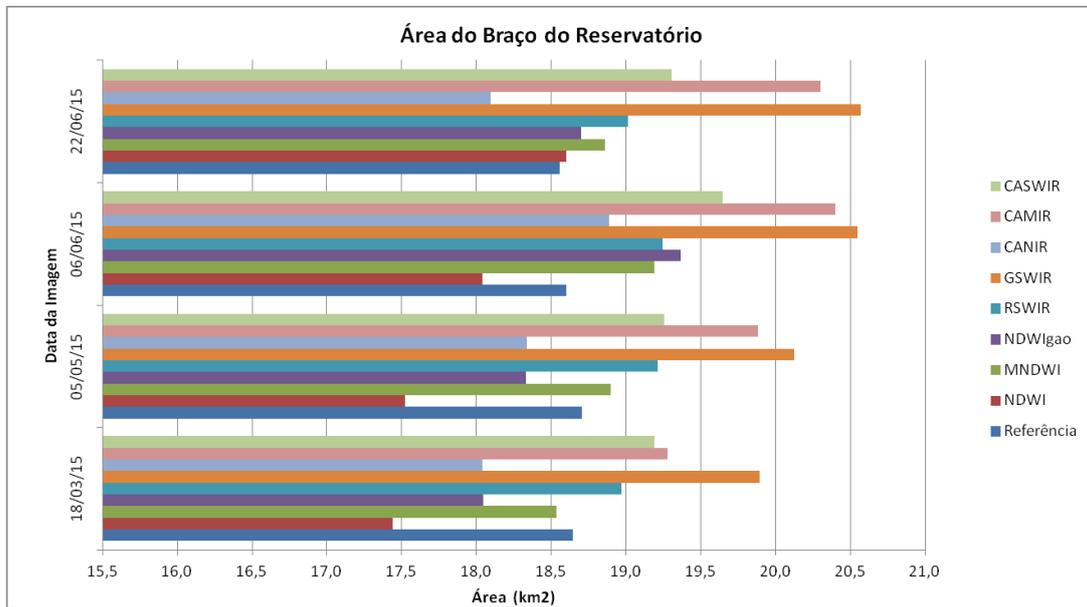


Figura 9. Área do Braço do Reservatório resultante de cada índice para as 4 datas de 2015.

Considerações finais

A partir dos resultados obtidos, foi possível constatar que todos os índices foram capazes de identificar o corpo d'água referente ao braço do reservatório, inclusive os 3 novos índices

propostos. Entretanto, percebeu-se que principal diferença entre os métodos se encontra na identificação dos pixels considerados “misturados”. Estes pixels apresentam características de transição entre as classes, normalmente trazendo uma mistura de respostas

espectrais do uso e cobertura do solo. Ou seja, dependendo da abordagem do índice, em função das bandas utilizadas para o cálculo, esses pixels eram ou não incluídos na classe de água.

Foi verificado também que os índices sofreram maior influência das bandas do infravermelho do que das bandas do visível, ou mesmo com a presença da nova banda *Coastal/Aerrosol* do Landsat 8, para inclusão ou não destes pixels misturados na classe de água.

Dentre os novos índices propostos que utilizam a banda *Coastal/Aerrosol*, o que obteve melhor resultado foi o CAMIR, por considerar os pixels misturados como da classe água, mas evitando de classificar os pixels misturados que continham maior parte da informação de outra classe de uso e cobertura do solo.

Contudo, pode-se afirmar que a detecção e mapeamento de corpos d'água utilizando-se de Índices de Água mostrou-se eficiente e objetiva, já que é uma ferramenta automática para processamento de imagens e que retira a subjetividade de operações manuais de mapeamento elaboradas por técnico especializado. Principalmente para os limites ou bordas do reservatório em que os pixels encontram-se misturados (água e outro uso), é possível escolher entre os índices o que melhor se adapta ao objetivo do mapeamento, incluindo ou não esses pixels à classe de corpo hídrico.

É importante salientar que essa técnica pode ser utilizada para diversas finalidades como, por exemplo, o monitoramento de lagos ou açudes utilizados para o abastecimento público; monitoramento em tempo quase real de grandes reservatórios; da dinâmica espacial e temporal de sedimentos em suspensão em rios ou reservatórios; da presença e proliferação de algas e plantas aquáticas ou ainda para o mapeamento de áreas atingidas por eventos de inundação, sendo todos produtos ou insumos importantes para o planejamento do território e gestão dos recursos hídricos.

Em relação as imagens do Landsat 8 e o novo sensor OLI, é importante destacar que o mesmo possui como grande vantagem a sua resolução radiométrica, o que permite registrar variações de intensidade de sinal discretizadas em 16 bits, tornando possível detectar variações de energia refletida pelos ambientes aquáticos (caracterizados por baixa intensidade de sinal).

Além disso, sua resolução temporal de 16 dias mostra grande capacidade para a geração de novas informações e monitoramento de recursos hídricos pelo menos 2 vezes ao mês (para períodos e imagens sem cobertura de nuvens). Portanto, a qualidade das imagens aliada com a distribuição

gratuita é grande importância para gestores públicos vinculados a órgãos ou institutos com a missão de preservar, fiscalizar e monitorar os recursos hídricos de uma determinada bacia hidrográfica, região ou até mesmo município.

Referências

- Gao, B., 1996. NDWI - a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment* 58, 257-266.
- Ji, L., Zhang, L., Wylie, B., 2009. Analysis of dynamic thresholds for the normalized difference water index. *Photogramm. Eng. Remote Sens* 75, 1307-1317.
- Li, W.; Du, Z.; Ling, F.; Zhou, D.; Wang, H.; Gui, Y.; Sun, B.; Zhang, X., 2013. A comparison of land surface water mapping using the Normalized Difference Water Index from TM, ETM+ and ALI. *Remote Sensing* 5, 5530-5549.
- Marinho, R. R.; Paradella, W. R.; Rennó, C. D.; Oliveira, C. G., 2012. Aplicação de imagens SAR orbitais em desastres naturais: mapeamento das inundações de 2008 no Vale do Itajaí, SC. *Revista Brasileira de Cartografia* [Online] 64. Disponível: https://www.academia.edu/2210433/aplica%3%87%c3%83o_de_imagens_sar_orbitais_em_desastres_naturais_mapeamento_das_inunda%3%87%c3%95es_de_2008_no_vale_do_itaja%3%8d_sc. Acesso: 12 jun. 2015.
- McFeeters, S.K., 1996. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing* 17, 1425-1432.
- Memon, A. A., Muhammad, S., & Rahman, S., 2015. Flood monitoring and damage assessment using water indices: A case study of Pakistan flood-2012, *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Scienc* 18, 99-106.
- Rogers, A.S., Kearney, M.S., 2004. Reducing signature variability in unmixing coastal marsh thematic mapper scenes using spectral indices. *International Journal of Remote Sensing* 25, 2317-2335.
- Serpico, S. B.; Dellepiane, S.; Boni, G.; Moser, G.; Angiati, E.; Rudari, R., 2012. Information extraction from remote sensing images for flood monitoring and damage evaluation. *Proc. IEEE* 100, 2946-2970.
- Xu, H., 2006. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing* 27, 3025-3033.

Wang, Y.; Colby, J. D.; Mulcahy, K. A., 2002. An efficient method for mapping flood extent in a

coastal floodplain using Landsat TM and DEM data. *International Journal of Remote Sensing* 23, 3681-3696.