

APLICAÇÃO DO MNDWI PARA MAPEAMENTO DAS ÁREAS INUNDÁVEIS DO PANTANAL DO CUIABÁ

Andressa Padovani **GIL**
Mestre em Geografia pela Universidade do Estado de Mato Grosso
E-mail: andressa.pgil@gmail.com
Orcid: <https://orcid.org/0009-0003-9691-7242>

Célia Alves de **SOUZA**
Doutora em Geografia. Docente do Programa de Pós-Graduação da Universidade do Estado
de Mato Grosso
E-mail: andressa.pgil@gmail.com
Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-9068-9328>

Recebido
Abril de 2023

Aceito
Março de 2024

Publicado
Abril de 2024

Resumo: A presente pesquisa analisou a aplicação do Índice de Diferença Normalizado da Água Modificado (MNDWI) para o mapeamento automatizado das áreas inundáveis do Pantanal do Cuiabá. Para o mapeamento, foi utilizada a série histórica de 1985 a 2018 considerando os períodos de cheia do rio Cuiabá, totalizando 33 imagens do satélite *Landsat 5*, 7 e 8. Para automatização do processo de mapeamento em todas as imagens, foi utilizado no *software ArcGIS 10.7* a ferramenta *Model Builder*, criando uma sequência de processamentos em lote. O MNDWI é um método desenvolvido com a finalidade de delinear os corpos d'água e realçá-los em imagens de satélite através da operação das bandas verde e do infravermelho médio. Os resultados obtidos nessa pesquisa possibilitaram a compreensão da dinâmica das inundações no Pantanal do Cuiabá, sendo possível identificar os pontos principais de avulsão do rio Cuiabá e de conexão de suas águas com as áreas inundadas na planície. As principais dificuldades e limitações encontradas na pesquisa foram: separação do solo e vegetação úmidos e dos corpos d'água, identificação de áreas inundadas com cobertura de vegetação aquática, mapeamento de canais estreitos que são extremamente comuns no Pantanal e lacunas causadas nos mapeamentos por conta da cobertura de nuvens.

Palavras-chave: MNDWI; inundações; Pantanal do Cuiabá.

APPLICATION OF THE MNDWI FOR MAPPING THE FLOODABLE AREAS OF THE CUIABÁ PANTANAL

Abstract: The present research analyzed the application of the Modified Normalized Water Difference Index (MNDWI) for the automated mapping of floodplain areas in the Pantanal of Cuiabá. For mapping, the historical series from 1985 to 2018 was used, considering the flood periods of the Cuiabá River, totaling 33 images from the Landsat 5, 7 and 8 satellite. To automate the mapping process in all images, the Model Builder tool was used in the ArcGIS 10.7 software, creating a sequence of batch processing. The MNDWI is a method developed with the purpose of delineating water bodies and highlighting them in satellite images through the operation of the green and mid-infrared bands. The results obtained in this research made it possible to understand the dynamics of floods in the Pantanal of Cuiabá, making it possible to identify the main points of avulsion of the Cuiabá River and the connection of its waters with the flooded areas in the plain. The main difficulties and limitations found in the research were: separation of the humid soil and vegetation and water bodies, identification of flooded areas with aquatic vegetation cover, mapping of narrow channels that are extremely common in the Pantanal and gaps caused in the mappings due to of cloud cover.

Keywords: MNDWI; floods; Cuiaba Pantanal.

APLICACIÓN DEL MNDWI PARA EL MAPEO DE LAS ÁREAS INUNDABLES DEL PANTANAL DE CUIABÁ

Resumen: La presente investigación analizó la aplicación del Índice de Diferencia de Agua Normalizado Modificado (MNDWI) para el mapeo automatizado de áreas de llanuras aluviales en el Pantanal de Cuiabá. Para el mapeo, se utilizó la serie histórica de 1985 a 2018, considerando los períodos de inundación del río Cuiabá, totalizando 33 imágenes del satélite Landsat 5, 7 y 8. Para automatizar el proceso de mapeo en todas las imágenes, se utilizó la herramienta Model Builder en el software ArcGis 10.7, creando una secuencia de procesamiento por lotes. El MNDWI es un método desarrollado con el propósito de delimitar cuerpos de agua y resaltarlos en imágenes satelitales mediante la operación de las bandas verde e infrarrojo medio. Los resultados obtenidos en esta investigación permitieron comprender la dinámica de las inundaciones en el Pantanal de Cuiabá, posibilitando identificar los principales puntos de avulsión del río Cuiabá y la conexión de sus aguas con las áreas inundadas de la llanura. Las principales dificultades y limitaciones encontradas en la investigación fueron: separación del suelo húmedo y la vegetación y cuerpos de agua, identificación de áreas inundadas con cobertura vegetal acuática, mapeo de canales angostos que son extremadamente comunes en el Pantanal y brechas causadas en los mapeos debido a de nubosidad.

Palabras-clave: MNDWI; inundaciones; Pantanal do Cuiabá.

INTRODUÇÃO

O Pantanal é uma das maiores áreas úmidas do mundo, e a maior planície contínua sazonalmente inundada, com uma área de aproximadamente 138.183 km² em território brasileiro, representando uma área de transição entre os domínios do Cerrado, do Chaco e da região Amazônica (Padovani, 2010; Cunha; Junk, 2014). Localiza-se na Bacia do Alto Paraguai (BAP), que pode ser compartimentada em duas grandes unidades do relevo: o planalto,

composto por áreas acima da cota de 200 metros, onde ocorrem os biomas Amazônia e Cerrado; e a planície, abaixo da cota de 200 metros. Na porção do território brasileiro, a BAP ocupa uma área de aproximadamente 362.259 km², dos quais 52% correspondem ao Mato Grosso e 48% ao Mato Grosso do Sul (Brasil, 2018).

No Pantanal, a utilização de geotecnologias vem sendo adotada desde o início dos anos 1990, sendo que o Plano de conservação da Bacia do Alto Paraguai (Brasil, 1997) utilizou-se de geoprocessamento para integração dos dados, resultando em diagnósticos e prognósticos para o planejamento ambiental da bacia hidrográfica. Além deste documento, pode-se citar também os estudos de Assine (2003), Zani (2008), Zani *et al.* (2009), Padovani (2010), Silva (2010), Corradini (2011), Merino (2011), Zarista (2013), Pupim (2014), Macedo (2017), entre outros.

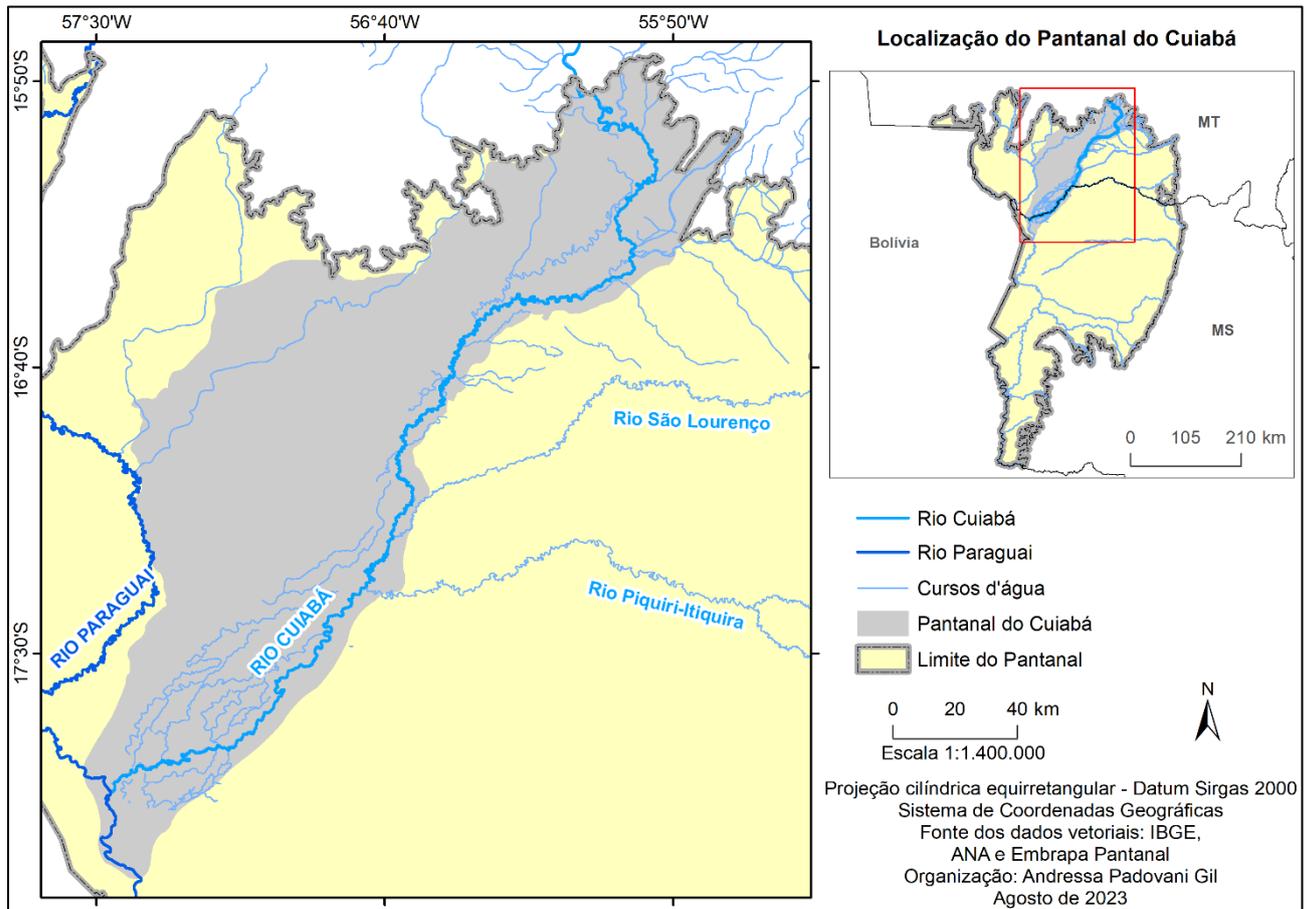
Embora sua importância ambiental seja mundialmente reconhecida e a quantidade de estudos para conhecimento de seu funcionamento venha aumentando consideravelmente, ainda são poucos os que objetivam analisar de maneira mais detalhada a dinâmica espacial das inundações da planície pantaneira, podendo citar as pesquisas de Silva (1991), Padovani (2010) e Zarista (2013). Esses estudos, entretanto, não objetivaram correlacionar a fundo a conectividade rio-planície de inundação.

Diante desta lacuna, a fim de contribuir para o melhor entendimento da dinâmica superficial das águas no Pantanal do Cuiabá, a presente pesquisa objetiva analisar uma metodologia automatizada para mapeamento das inundações. Optou-se por utilizar o Índice de Diferença da Água Normalizada Modificado (MNDWI), metodologia desenvolvida por McFeeters (1996) e posteriormente modificada por Xu (2006), com o objetivo de detectar e delinear automaticamente corpos d'água em imagens orbitais. O MNDWI foi aplicado em imagens do satélite Landsat no período de 1985 a 2018, com a finalidade de mapear as áreas inundáveis do Pantanal do Cuiabá.

Área de estudo

Nesta pesquisa, a delimitação do Pantanal do Cuiabá foi feita com base de referência na delimitação do mega leque do Cuiabá proposto por Pupim (2014), adaptada para incluir pequenas áreas ao norte do megaleque, mas ainda dentro da planície pantaneira. A Figura 1 apresenta a localização da área de estudo, denominada de Pantanal do Cuiabá, cuja área é de aproximadamente 17.136,90 km².

Figura 1 – Mapa de localização do Pantanal do Cuiabá

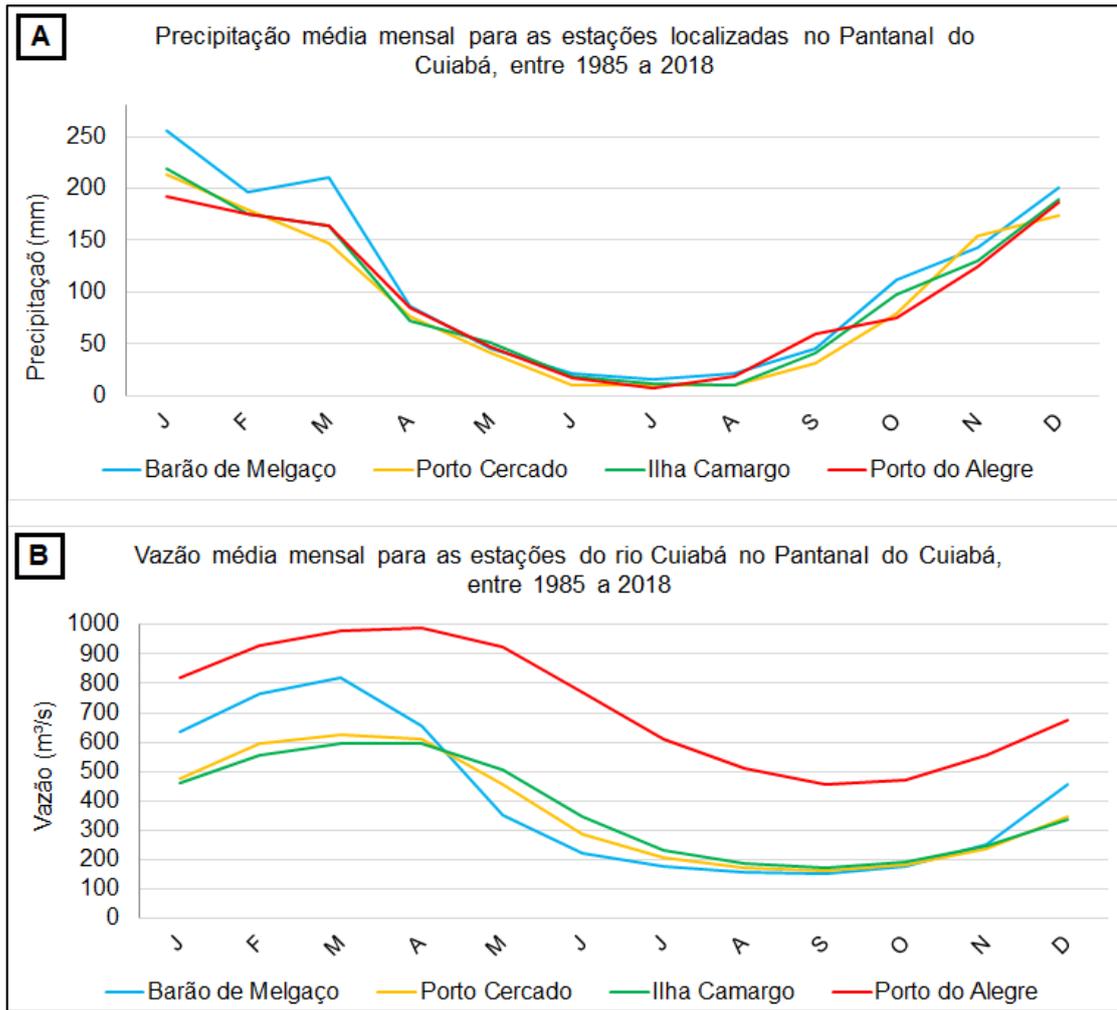


Fonte: IBGE; ANA; EMBRAPA. Organização: Andressa Padovani Gil (2023).

A região do Pantanal do Cuiabá se enquadra no clima Tropical Chuvoso - Aw de Köppen e segundo dados coletados junto à Agência Nacional de Águas ([S. d.]), os valores de precipitação anual média de 1985 a 2018 variaram entre 1.128 mm a 1.353 mm. A precipitação média mensal para as estações localizadas no Pantanal do Cuiabá apresenta maiores valores no mês de janeiro (Figura 2 A), enquanto as vazões médias mensais do rio Cuiabá para as mesmas estações apresentam maiores valores entre os meses de fevereiro a abril (Figura 2 B).

As estações nos gráficos da Figura 2 estão apresentadas em ordem de montante (estação Barão de Melgaço) para jusante (estação Porto do Alegre). Observa-se que a precipitação apresenta maiores valores a montante, na estação Barão de Melgaço; enquanto a vazão decai da estação Barão de Melgaço até a estação Ilha Camargo, pois neste trecho o rio Cuiabá apresenta um padrão multicanal com processos de avulsão e perda de água para a planície. Entre as estações Ilha Camargo e Porto do Alegre ocorre a confluência do rio São Lourenço com o rio Cuiabá, o que contribui para o aumento da vazão do rio na última estação.

Figura 2 - Gráficos de precipitação média mensal e vazão média mensal para as estações localizadas no Pantanal do Cuiabá



Fonte: Agência Nacional de Águas ([S. d.]). Organização: os autores.

METODOLOGIA

Para alcançar o objetivo proposto foi realizado a aquisição e organização de dados secundários, como: dados de cotas de nível diário do rio Cuiabá para a estação Cuiabá (código 66260001) para identificação dos períodos de cheias do rio, no período de 1985 a 2018, coletados no portal HidroWeb da Agência Nacional das Águas (2019); imagens *raster* do satélite *Landsat* nas séries 5, 7 8, disponíveis gratuitamente no site do Serviço Geológico Americano (USGS, 2019), e dados *shapefile* coletados na ANA e IBGE, como os limites do Pantanal, dos municípios, a hidrografia, as estações meteorológicas, etc. A escolha do período de análise (1985 a 2018) se deu por conta da disponibilidade de dados de nível do rio e da

disponibilidade de imagens do satélite *Landsat*. A Tabela 1 apresenta a organização das imagens *Landsat* que foram coletadas e utilizadas.

Tabela 1 - Imagens *Landsat* coletadas para o período de cheia do rio Cuiabá

Data	Nível	Órbita/ponto	Setor do rio, no Pantanal	Satélite/ sensor
17/01/1988	500	226/71	Montante	L5 / TM
20/02/1989	509	226/71	Montante	L5 / TM
24/03/1989	792	226/71	Montante	L5 / TM
21/10/1990	405	226/71	Montante	L5 / TM
14/01/1993	623	226/71	Montante	L5 / TM
03/03/1993	480	226/71	Montante	L5 / TM
27/03/1996	397	226/71	Montante	L5 / TM
04/03/2002	664	226/71	Montante	L7 / ETM +
31/03/2009	432	226/71	Montante	L5 / TM
16/04/2009	447	226/71	Montante	L5 / TM
26/12/2014	418	226/71	Montante	L8 / OLI-TIRS
18/03/2016	484	226/71	Montante	L8 / OLI-TIRS
01/02/2017	380	226/71	Montante	L8 / OLI-TIRS
17/01/1988	500	226/72	Médio	L5 / TM
24/03/1989	792	226/72	Médio	L5 / TM
21/10/1990	405	226/72	Médio	L5 / TM
08/02/1996	460	226/72	Médio	L5 / TM
27/03/1996	397	226/72	Médio	L5 / TM
20/03/1999	452	226/72	Médio	L5 / TM
04/03/2002	664	226/72	Médio	L7 / ETM +
23/03/2003	438	226/72	Médio	L7 / ETM +
29/01/2004	483	226/72	Médio	L5 / TM
16/04/2009	447	226/72	Médio	L5 / TM
13/03/2014	400	226/72	Médio	L8 / OLI-TIRS
26/12/2014	418	226/72	Médio	L8 / OLI-TIRS
18/03/2016	484	226/72	Médio	L8 / OLI-TIRS
20/03/1985	478	227/72	Jusante	L5 / TM
21/04/1985	403	227/72	Jusante	L5 / TM
08/01/1994	432	227/72	Jusante	L5 / TM
26/02/2006	615	227/72	Jusante	L5 / TM
19/03/2008	500	227/72	Jusante	L5 / TM
31/01/2014	492	227/72	Jusante	L8 / OLI-TIRS
12/03/2017	425	227/72	Jusante	L8 / OLI-TIRS

Fonte: Gil (2022).

Os mapeamentos e processamento de todos os dados vetoriais e matriciais foram realizados no ambiente SIG *ArcGIS* 10.7 e transformados para o Datum SIRGAS 2000, Zona 21 sul. Todos os dados vetoriais trabalhados foram no formato *shapefile*, portanto, na descrição dos procedimentos serão chamados de *shapefile*.

PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Escolha das imagens orbitais

Para analisar inundações no Pantanal do Cuiabá e identificar os pontos de conectividade rio-planície, optou-se por utilizar técnicas de sensoriamento remoto em imagens dos satélites Landsat 5, 7 e 8, aplicando o Índice da Diferença Normalizada da Água Modificado (MNDWI), nos momentos em que o rio extravasa e perde água para a planície. Este índice mapeia automaticamente os corpos d'água presentes na área de estudo.

Para assegurar que o mapeamento fosse o mais abrangente possível, optou-se por utilizar todas as imagens orbitais disponíveis (com qualidade adequada) no período de cheia do rio Cuiabá, utilizando os dados históricos de nível diário do rio no período de 01 de janeiro de 1985 a 29 de junho de 2018.

Foi utilizado o cálculo da cota de permanência de 10% para identificar os valores de cheia do rio Cuiabá, o mesmo aplicado pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM) nos boletins de previsão hidrológica e de alerta de enchentes no Pantanal Mato-grossense (Serviço Geológico do Brasil, 2020). Para realização do cálculo da cota de permanência foi utilizado o programa *Microsoft Excel*.

Identificado o valor da cota de permanência de 10% do rio Cuiabá, prosseguiu-se com a busca das imagens orbitais para todo o período de cheia do rio. As imagens dos satélites *Landsat 5, 7 e 8* foram buscadas em três cenas (órbita/ponto), que registram todo o percurso do rio Cuiabá dentro do Pantanal, sendo elas: órbita/ponto 226/71, que abrange o trecho de montante, logo ao entrar no Pantanal; órbita/ponto 226/72, que abrange o trecho médio; e órbita/ponto 227/72, que abrange o trecho de jusante, na desembocadura com o rio Paraguai.

Em função do tamanho da área estudada, para poder visualizar em maior escala os mapeamentos produzidos, a mesma foi compartimentada em três, considerando as cenas das imagens orbitais utilizadas: compartimento I, que abrange o trecho de montante; compartimento II, que abrange o trecho médio e compartimento III, que abrange o trecho de jusante. Como as imagens orbitais se sobrepõem em alguns trechos das bordas, os compartimentos de análise também se sobrepõem.

Aplicação do MNDWI

O Índice da Diferença Normalizada da Água (NDWI - *Normalized Difference Water Index*) é um método desenvolvido por McFeeters (1996), com a finalidade de delinear as águas abertas e realçá-las em imagens de satélite. Trata-se de uma variação do Índice de Vegetação

por Diferença Normalizada (NDVI), trocando as variáveis para obter resultados melhores voltados para o mapeamento das águas. O NDWI permite: maximizar a refletância da água através do uso da banda verde; minimizar a baixa refletância da água na banda do infravermelho próximo e aumentar o contraste entre água, vegetação e solo. O índice se utiliza da banda verde e da banda do infravermelho próximo, seguindo a seguinte equação (Mcfeeters, 1996):

$$\text{NDWI} = \frac{\text{banda verde} - \text{infravermelho próximo}}{\text{banda verde} + \text{infravermelho próximo}}$$

A aplicação da equação acima para o satélite *Landsat 5* corresponde a: $\text{NDWI} = (\text{banda } 2 - \text{banda } 4) / (\text{banda } 2 + \text{banda } 4)$. Para o *Landsat 8*, a equação fica: $\text{NDWI} = (\text{banda } 3 - \text{banda } 5) / (\text{banda } 3 + \text{banda } 5)$.

O NDWI gera uma nova imagem, cujo valor dos pixels varia de -1 a 1, sendo 0 o limiar entre os alvos que são água e o que não são água. Ou seja: todos os pixels com valor igual ou menor que zero não são água ($\text{NDWI} \leq 0$), e todos os pixels que possuem valor maior que 0 são água ($\text{NDWI} > 0$). Assim, na imagem gerada pelo NDWI, os corpos d'água são evidenciados, conferindo maior valor de brilho, enquanto as feições de solo e vegetação são minimizadas.

Posteriormente, Xu (2006) propôs uma modificação na equação do modelo, criando o Índice da Diferença Normalizada da Água Modificado (MNDWI - *Modified Normalized Difference Water Index*), que substitui a banda do infravermelho próximo para o infravermelho médio, a fim de obter melhores resultados em regiões que possuem áreas construídas, visto que no NDWI estas se misturam com os corpos d'água. A equação do MNDWI de Xu (2006) é:

$$\text{MNDWI} = \frac{\text{banda verde} - \text{infravermelho médio}}{\text{banda verde} + \text{infravermelho médio}}$$

Segundo o autor, o MNDWI permite que a água apresente valores ainda mais positivos, visto que a banda do infravermelho médio absorve mais energia nos corpos d'água que a banda do infravermelho próximo; distinguir a água das áreas construídas, pois o uso da banda do infravermelho médio atribui, no índice, valores negativos às áreas construídas; e promover maior contraste com as áreas de solo, que possuem maior refletância na banda do infravermelho médio do que no infravermelho próximo. O autor conclui, ainda, que o MNDWI revela maiores detalhes dos corpos d'água do que o NDWI, promovendo uma melhoria considerável na separação dos alvos “água” e “não água”.

Optou-se por utilizar o MNDWI modificado por Xu (2006), por apresentar melhores resultados em trabalhos já realizados anteriormente no Pantanal (GIL *et al.*, 2019). As bandas utilizadas foram: verde e infravermelho médio 2, ou infravermelho de ondas curtas 2 (SWIR 2), ficando a equação:

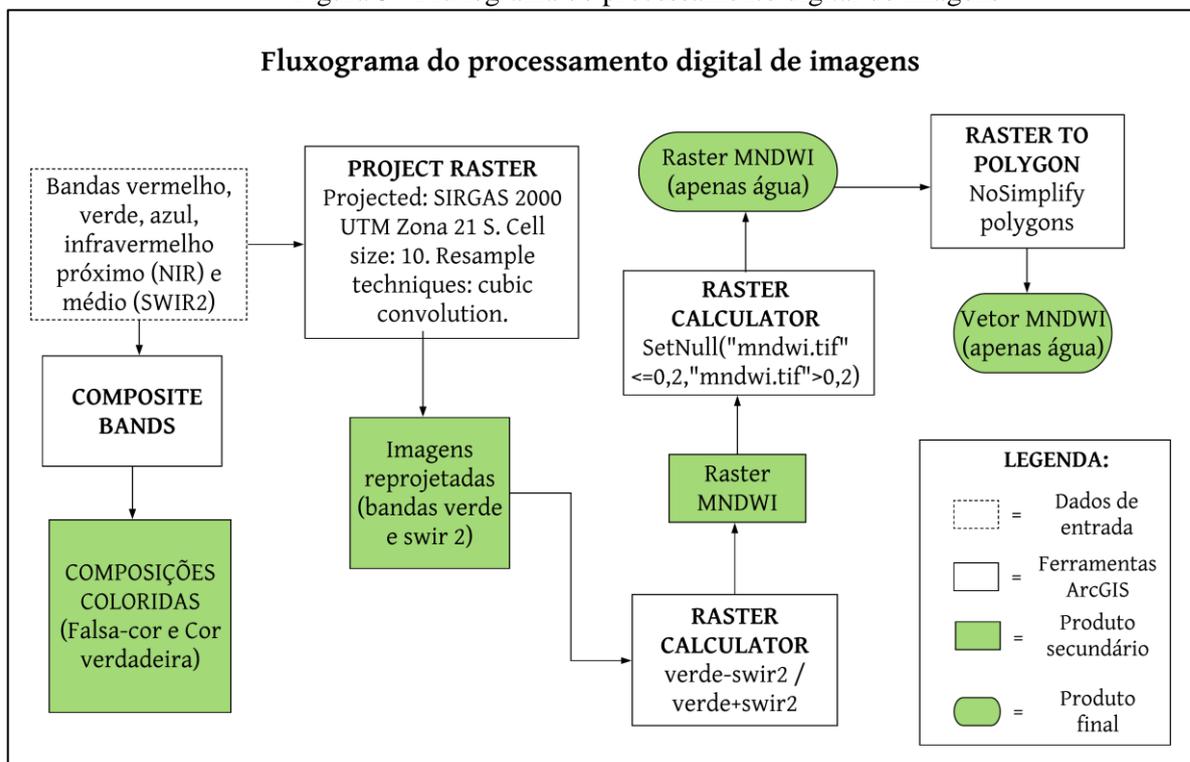
$$\text{Landsat 5 e 7:} \quad \text{MNDWI} = \frac{b2 - b7}{b2 + b7}$$

$$\text{Landsat 8:} \quad \text{MNDWI} = \frac{b3 - b7}{b3 + b7}$$

Além disso, após diversos testes visuais realizados, adotou-se o limiar de 0,2 para diferenciar os alvos água de não-água, que apresentou melhores resultados para o mapeamento de canais estreitos, que são bastante comuns no Pantanal.

A Figura 3 apresenta fluxograma geral do processamento digital de imagens. Após a coleta de dados dos níveis do rio, cálculo da curva de 10% e coleta de imagens *Landsat* para os períodos de cheia do rio Cuiabá, os processamentos de imagem se iniciaram com a realização das composições coloridas, a fim de auxiliar o processo de interpretação visual dos mapeamentos gerados pelo MNDWI.

Figura 3 - Fluxograma do processamento digital de imagens



Fonte: Gil (2022).

Para a realização da composição em cor verdadeira, para as imagens dos satélites *Landsat 5* e *7* foi realizada a combinação RGB com as bandas 3 (vermelho), 2 (verde), 1 (azul), respectivamente. Para as imagens do *Landsat 8*, a composição RGB foi realizada com as bandas 4 (vermelho), 3 (verde) e 2 (azul), respectivamente.

Além dessa, a composição falsa-cor que é comumente utilizada combina as bandas do infravermelho médio, do infravermelho próximo e do vermelho. Para os satélites *Landsat 5* e *7*, essa é a combinação RGB 543, e para o *Landsat 8*, a combinação é RGB 654.

Posteriormente, realizou-se a reprojeção das bandas verde e SWIR 2 (bandas 2 e 7 para o *Landsat 5* e *7* e bandas 3 e 7 para o *Landsat 8*), através ferramenta *Project Raster*, para o datum SIRGAS 2000, projeção UTM zona 21 S, com tamanho de célula de 10 metros e reamostragem por convolução cúbica. Após a realização de testes, essa reamostragem possibilitou ao mapeamento gerado pelo MNDWI o traçado mais preciso de canais estreitos, que nas imagens com resolução espacial de 30 metros não eram mapeados ou resultavam em traçados grosseiros e desproporcionais.

Com as bandas verde e SWIR 2 reprojctadas, foi realizada a geração do MNDWI através da ferramenta *Raster Calculator*. Após isto, a partir do MNDWI foi gerada uma nova imagem contendo apenas os pixels referentes à água, a partir da ferramenta *Raster Calculator*. A nova imagem de água foi, por fim, transformada em *shapefile* através da ferramenta *Raster to Polygon*. A transformação da imagem do MNDWI contendo apenas dados de água em arquivo vetorial permite uma melhor visualização das áreas inundadas, dos pontos em que ocorre conectividade entre o rio e os corpos d'água da planície e possibilita o cálculo da área inundada.

Considerando a alta quantidade de imagens processadas nesse estudo (33 imagens), os processamentos foram feitos de modo automatizado através da ferramenta *Model Builder* do *ArcGIS*.

Nas áreas em que há conectividade do rio com a planície, o polígono do canal do rio principal ficou unido a esses corpos d'água da planície, como uma feição única. Entretanto, por conta da complexidade da dinâmica de águas superficiais do Pantanal, nem toda a área dos corpos d'água conectada ao rio Cuiabá foi inundada por extravasamento do seu leito. Durante as cheias, a precipitação local que incide sobre a planície, cujas declividades são muito baixas, também contribui para a inundação, enchendo de água os paleocanais que são reativados e formam uma grande massa de água, que pode se juntar com o leito do rio.

Por este motivo, para não superestimar as áreas que inundam por extravasamento do rio Cuiabá, os dados vetoriais foram separados em dois polígonos: um que considera toda área conectada o rio; e outro que considera apenas as áreas onde há extravasamento do rio. A

separação dos polígonos foi feita pela edição vetorial: ferramenta *Editor - Cut Polygons Tool*, utilizando como apoio os dados de vazão das estações fluviométricas: foi considerada como área que recebe extravasamento do rio Cuiabá apenas os trechos em que ocorre diminuição dos valores de vazão. Além disso, também se utilizou como apoio para identificação das áreas que recebem extravasamento do rio Cuiabá pesquisas realizadas por outros autores na área de estudo, que são discutidas no capítulo de resultados.

Os polígonos de conectividade do rio e de extravasamento do rio de cada uma das datas de cada compartimento (montante, médio e jusante) foram unificados em dois únicos *shapes*, através da ferramenta *Union*. Posteriormente, os *shapes* dos três compartimentos também foram unificados através da ferramenta *Union*, obtendo por fim dois *shapes* que contemplam toda a área do Pantanal do Cuiabá: um de extravasamento do rio e um de conectividade com o rio.

Importante citar também que em todos os compartimentos analisados, existem algumas imagens com lacunas nos *shapes* do rio Cuiabá e sua conectividade com as áreas inundadas, por conta da cobertura de nuvem sobre os alvos. A coloração branca da nuvem é oposta à resposta espectral dos corpos d'água (escuro / preto), deste modo, o MNDWI considera estes trechos como pixels não água, deixando lacunas nos corpos d'água.

Análise e interpretação dos dados

Após o processamento dos dados coletados, foi realizado o mapeamento e análise da dinâmica de inundação do Pantanal do Cuiabá buscando identificar a influência do rio Cuiabá para as inundações da planície de entorno. Para tal, foram utilizados como apoio as imagens orbitais em composições coloridas de cor verdadeira e falsa-cor (RGB 543), a fim de auxiliar no processo de fotoidentificação e fotointerpretação dos alvos da imagem. Como resultado foram produzidos os mapas de inundação do Pantanal do Cuiabá para todas as imagens coletadas.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

O valor da cota de permanência de 10% foi de 377 cm, que se estendeu até a cota de permanência de 10,03%. Dentro do período de cheia do rio, totalizaram 1.226 dados de nível diário do rio, cujas datas foram utilizadas para busca de imagens de satélite.

Do total de 1.226 datas buscadas, foram obtidas 33 imagens com boa qualidade, considerando dois fatores: a resolução temporal do satélite *Landsat*, que leva 16 dias; e a alta cobertura de nuvens no período buscado, visto que a grande maioria das datas correspondentes ao período de cheia do rio corresponde também aos meses de maior precipitação na bacia hidrográfica: entre dezembro a março. Das 33 imagens: 13 são do compartimento de montante

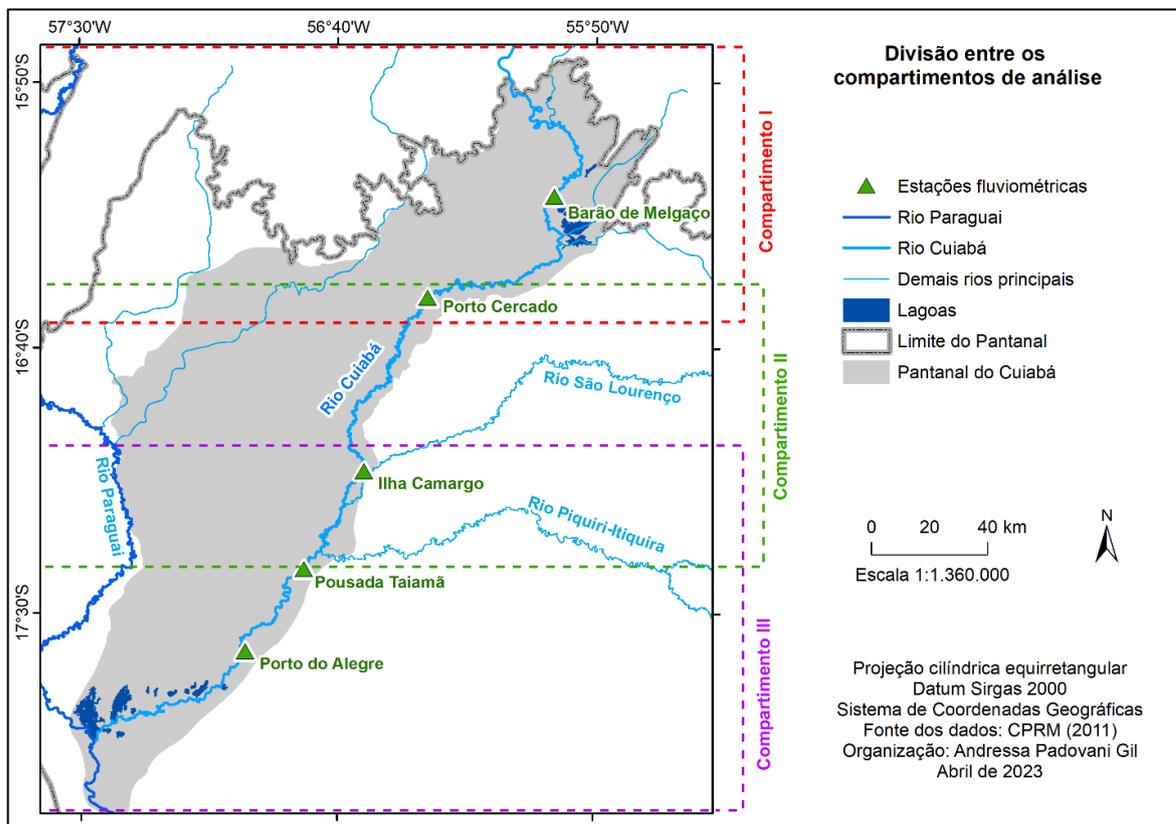
do rio, 13 do compartimento médio e 7 do compartimento de jusante, como pôde se observar no Tabela 1.

O compartimento de jusante possui a menor quantidade de imagens disponíveis em boa qualidade, e as imagens de 1994, 2008 e 2014 possuem certa cobertura de nuvens próxima a foz do rio Cuiabá, o que causou lacunas no mapeamento gerado. Entretanto, por conta da pequena quantidade de imagens disponível, optou-se por utilizá-las mesmo assim; caso contrário, a quantidade de imagens analisada neste compartimento seria ainda menor.

Análise do mapeamento das áreas inundáveis no Pantanal do Cuiabá

O mapeamento das inundações do Pantanal do Cuiabá pelo MNDWI proporcionou informações importantes sobre a dinâmica hidrológica e o papel do rio Cuiabá nas inundações dessa região. A Figura 4 apresenta os compartimentos de análise que serão apresentados a seguir.

Figura 4 - Divisão entre os compartimentos de análise



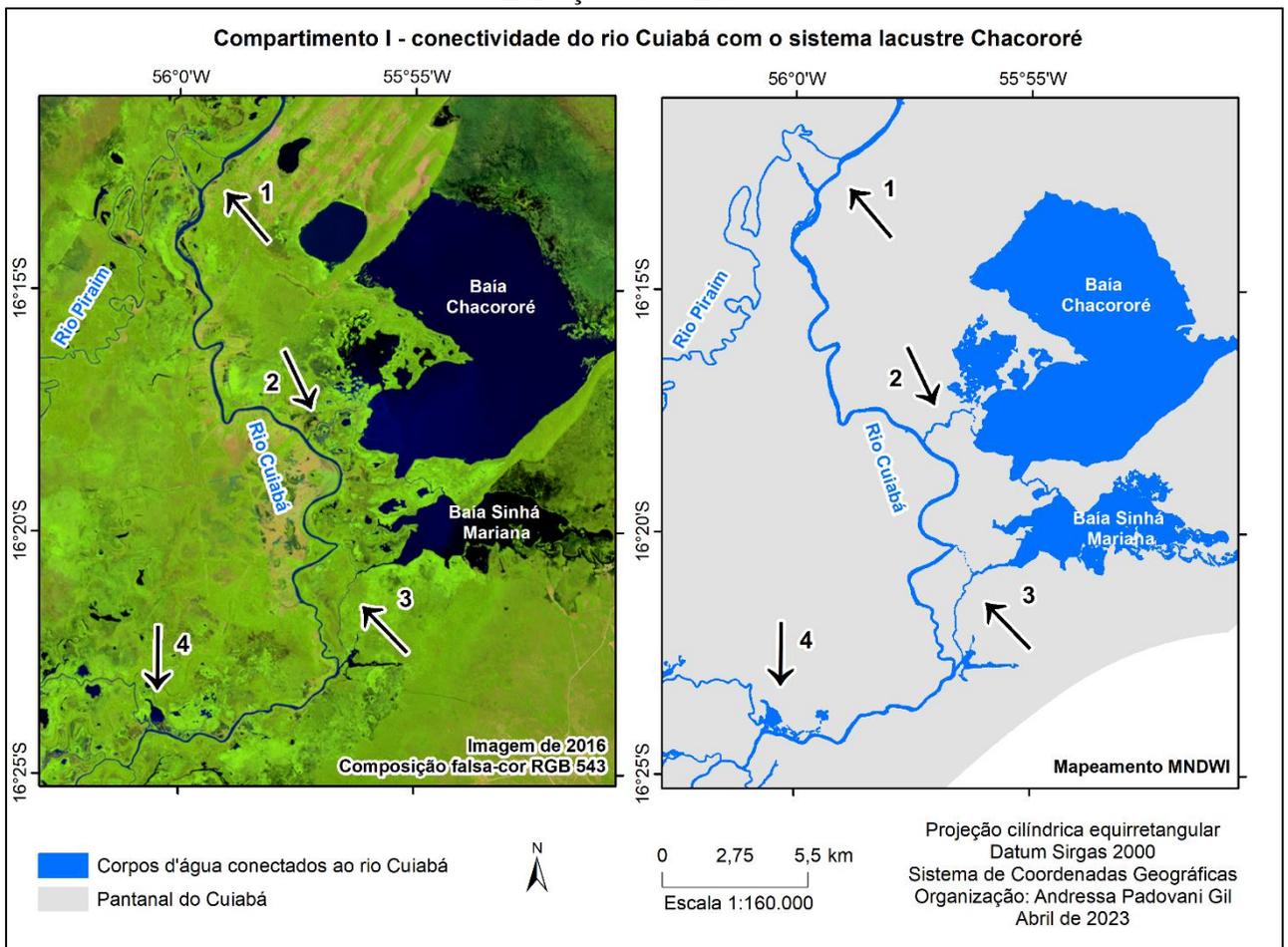
Fonte: CPRM (2011). Organização: Andressa Padovani Gil (2023).

O primeiro compartimento de análise apresenta o trecho em que o rio Cuiabá entra no Pantanal, até as proximidades da estação fluviométrica Porto Cercado. Esse compartimento

possui uma grande área inundada por extravasamento das águas do rio Cuiabá, e outras áreas inundadas em conexão com o rio Cuiabá que não recebem suas águas. É possível observar corpos d'água em conectividade direta com o rio Cuiabá mapeados pelo MNDWI para as imagens da cena de montante.

Ao adentrar no Pantanal, o rio Cuiabá percorre aproximadamente 473 m com uma morfologia de canal único meandrante, até as proximidades da estação fluviométrica Barão do Melgaço, onde começa a se bifurcar, adquirindo um padrão multicanal. O MNDWI possibilitou identificar e mapear pequenos canais que fazem uma importante conectividade do rio Cuiabá com o sistema lacustre nessa área, como pode se observar na Figura 5. A seta 1 indica a bifurcação do rio Cuiabá, que dá origem ao rio Piraim; as setas 2 e 3 indicam os corixos que fazem conexão do rio Cuiabá com a Baía Chacororé e Baía Sinhá Mariana.

Figura 5 - Compartimento I - conectividade do rio Cuiabá com o sistema lacustre Cachororé e bifurcações do canal

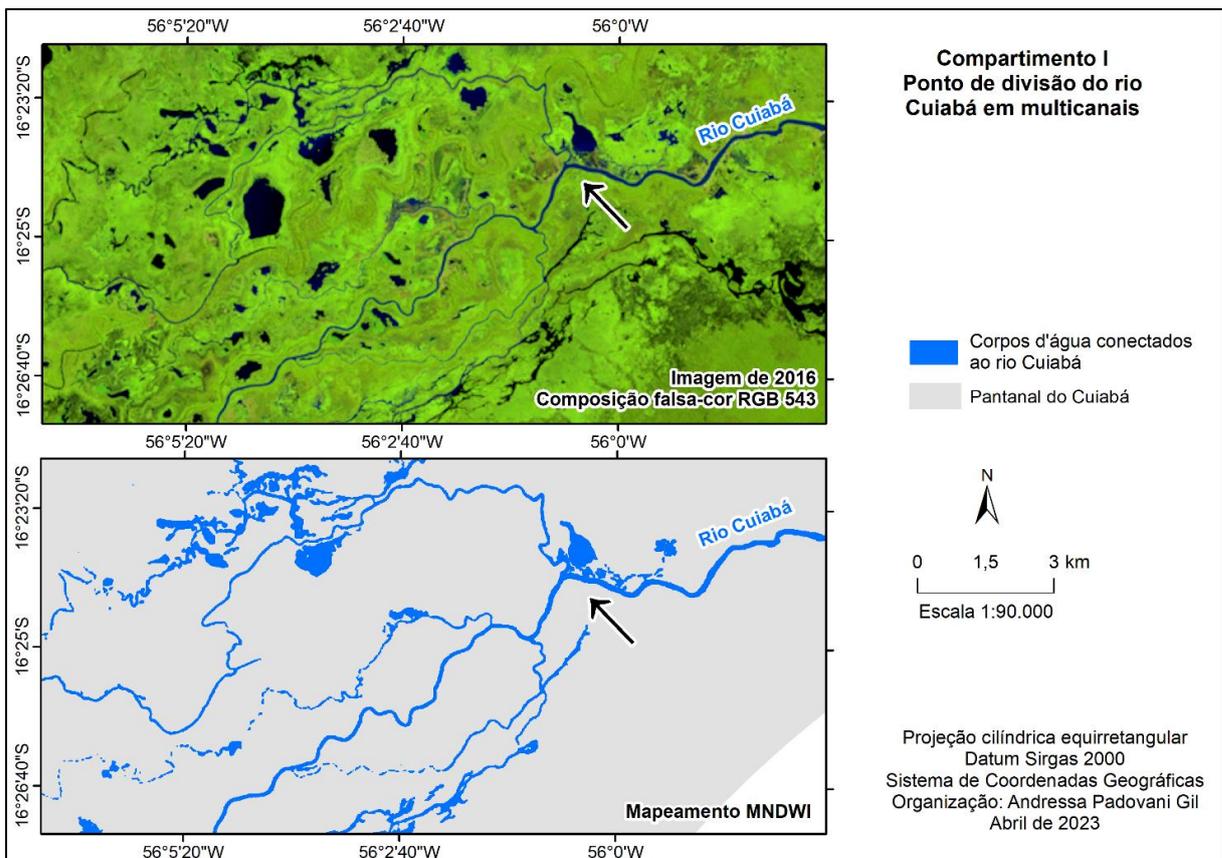


Fonte: Organização: Andressa Padovani Gil (2023).

A seta 4 da Figura 5 indica o ponto em que o rio Cuiabá muda seu padrão de canal único e se divide em multicanais. A partir desse ponto, o rio Cuiabá perde água significativa para a

planície, formando uma grande área inundada sob sua influência, como pode se observar na Figura 5. Os dados coletados na ANA mostram a queda da vazão média da estação fluviométrica de Barão de Melgaço, a montante deste ponto, à estação Porto Cercado, a jusante, o que reforçam a perda de água do rio para a planície. A seta da Figura 6 indica o mesmo ponto da seta 4 da Figura 5. Na Figura 6 é possível observar a imagem colorida em falsa-cor e o mapeamento do MNDWI das áreas inundadas na planície em conexão com o rio Cuiabá.

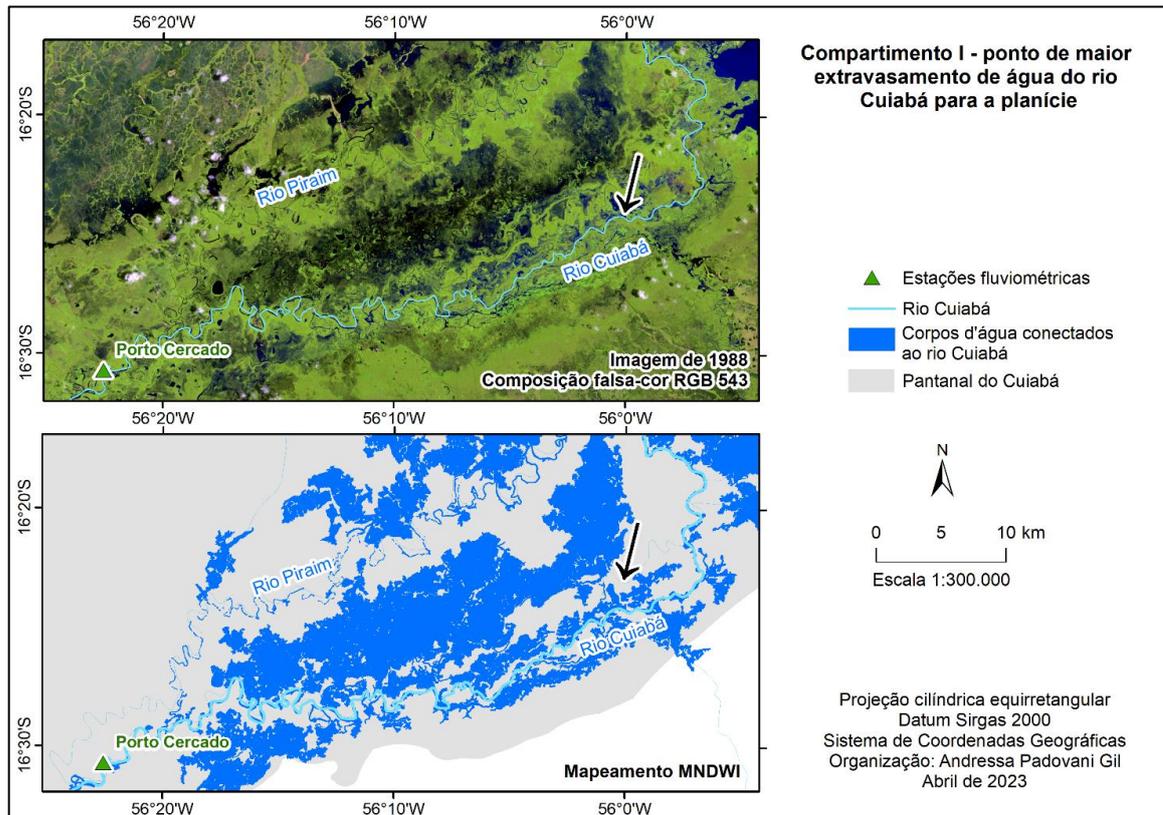
Figura 6 - Compartimento I -ponto de divisão do rio Cuiabá em multicanais



Fonte: Organização: Andressa Padovani Gil (2023).

O primeiro compartimento de análise registra a maior concentração de perda de água do rio Cuiabá para a planície, sendo que a área identificada na Figura 6 é onde ocorre a maior inundação. Na Figura 7 é possível analisar esta mesma área, apresentando o mapeamento da cheia de 1988, que foi a maior de todo o período analisado. A seta preta nesta figura indica o mesmo ponto da seta preta da Figura 6, onde o rio Cuiabá adquire um novo padrão multicanal, não sendo possível visualizar essa mudança no padrão de canal com clareza na Figura 7 por conta do excesso de corpos d'água misturados. Na imagem colorida de composição falsa-cor, os alvos azuis e pretos referem-se a corpos d'água, podendo-se observar uma grande massa d'água conectada ao rio Cuiabá.

Figura 7 - Compartimento I - ponto de maior extravasamento de água do rio Cuiabá para a planície



Fonte: Organização: Andressa Padovani Gil (2023).

Após a confluência com o rio Piraim no setor de montante, no compartimento II o rio Cuiabá volta a fluir em um canal com padrão predominantemente meandrante, formando um complexo de dique-canal topograficamente mais elevado que as terras do entorno (PUPIM, 2014). Ele corre paralelo à borda oeste do Pantanal do Cuiabá.

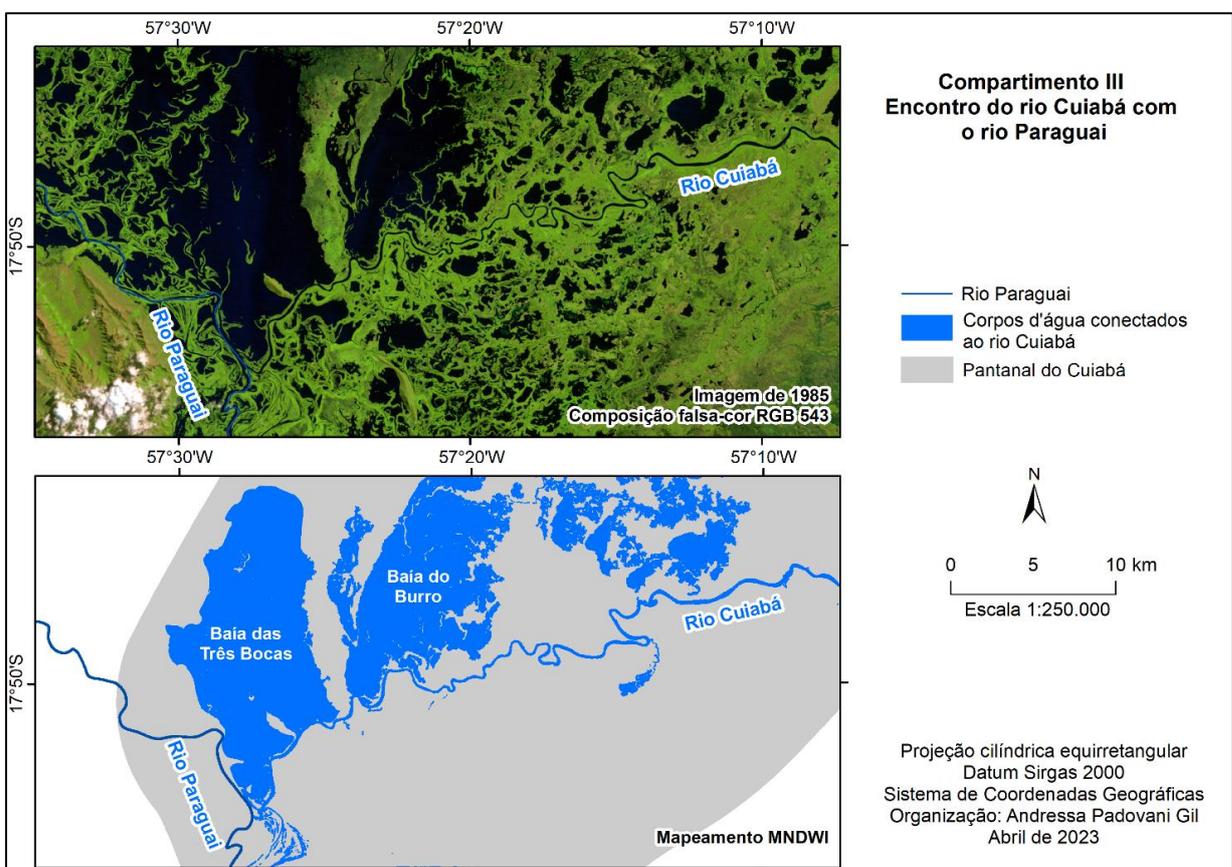
Nesse compartimento, as áreas conectadas diretamente ao rio Cuiabá são consideravelmente menos expressivas que no primeiro, abrangendo apenas pequenas áreas próximas ao canal principal. Assim, não há perda expressiva de água do rio Cuiabá para a planície nesse setor, fato este confirmado pelos dados de vazão média mensal das estações de montante (Porto Cercado) e de jusante (Ilha Camargo), que não apresentam queda significativa. Por este motivo, não serão apresentadas aqui os mapas de inundação referentes ao compartimento II.

O compartimento III compreende o trecho final do rio Cuiabá, das proximidades da estação fluviométrica Ilha Camargo até desaguar no rio Paraguai. Próximo a sua foz no rio Paraguai, observa-se perda de água do rio Cuiabá para a planície e uma inundação de áreas consideráveis. Nessa região, o rio Paraguai também perde água para a planície, formando grandes corpos d'água que se misturam com as águas extravasadas do rio Cuiabá, não sendo

possível identificar com precisão a contribuição isolada de cada um. Existem, também, inúmeras lagoas, tanto à margem esquerda quanto à direita do rio Cuiabá, das quais o rio faz conexão direta com apenas algumas.

É possível observar na Figura 8 que o rio Cuiabá faz conexão direta com o sistema lacustre da Baía do Burro e Baía das Três Bocas, perdendo água para essas lagoas. Os demais corpos d'água a oeste da lagoa Baía de Três Bocas estão sob maior influência do rio Paraguai, portanto não foram considerados como área de extravasamento do rio Cuiabá.

Figura 8 - Compartimento III - Foz do rio Cuiabá no encontro com o rio Paraguai



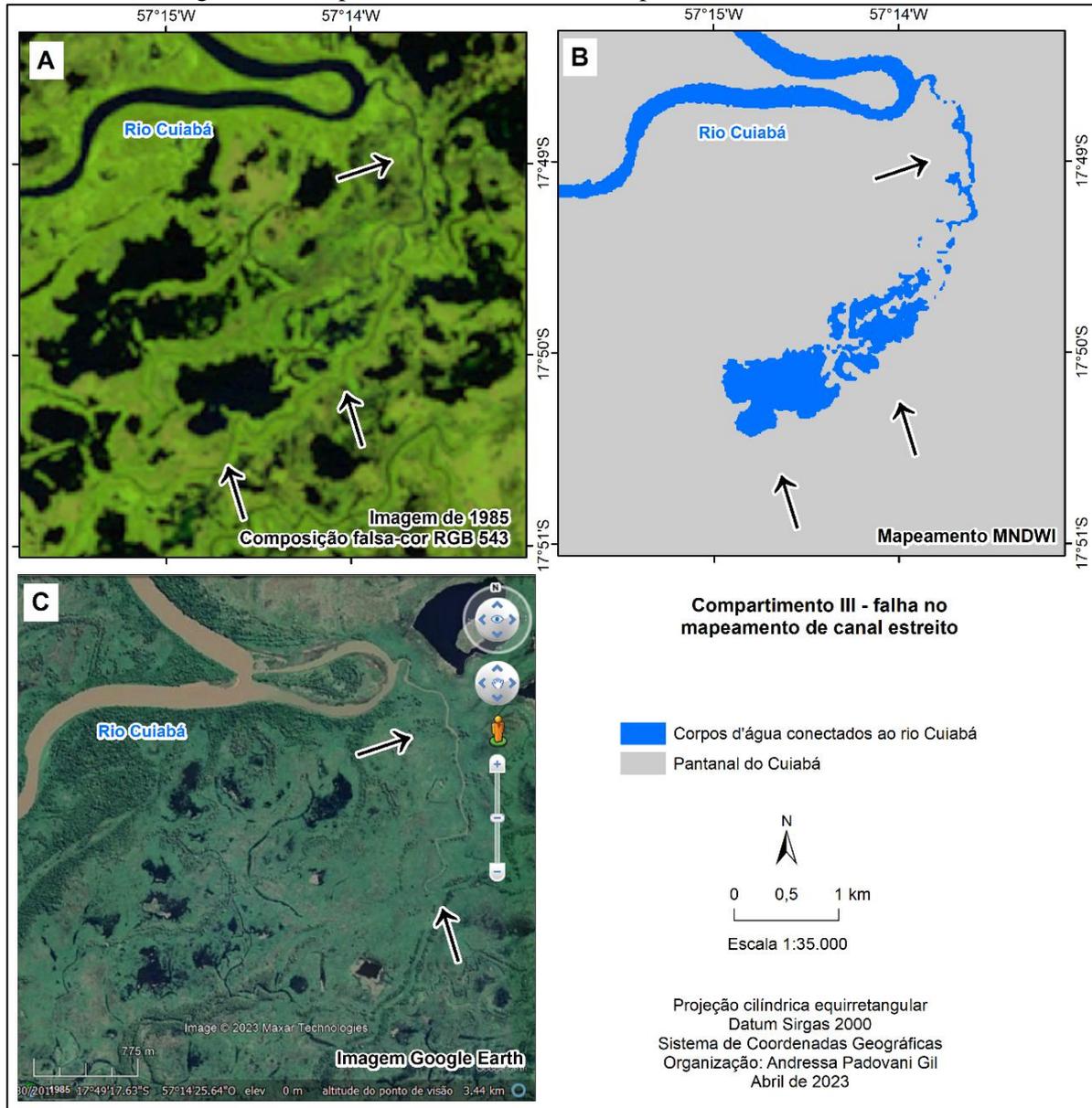
Fonte: Organização: Andressa Padovani Gil (2023).

No trecho final do rio Cuiabá, já próximo a sua foz, o rio possui alguns pontos de arrombamento que geram estreitos canais que extravasam água para a planície. Alguns desses canais se bifurcam, deságuam em pequenas lagoas ou geram espraiamento das águas inundando a planície, e outros simplesmente cessam o fluxo de água sem desaguar em outro corpo d'água ou gerar grandes inundações.

Os mapeamentos gerados pelo MNDWI de maneira geral apresentaram resultado satisfatório porém com limitações, apresentando baixa acurácia no mapeamento de canais mais

estreitos. Na Figura 9 é possível observar um ponto de rompimento do rio Cuiabá em sua margem esquerda, correndo no sentido nordeste, que o MNDWI não pôde mapear.

Figura 9 - Compartimento III - falha no mapeamento de canal estreito



Fonte: Organização: Andressa Padovani Gil (2023).

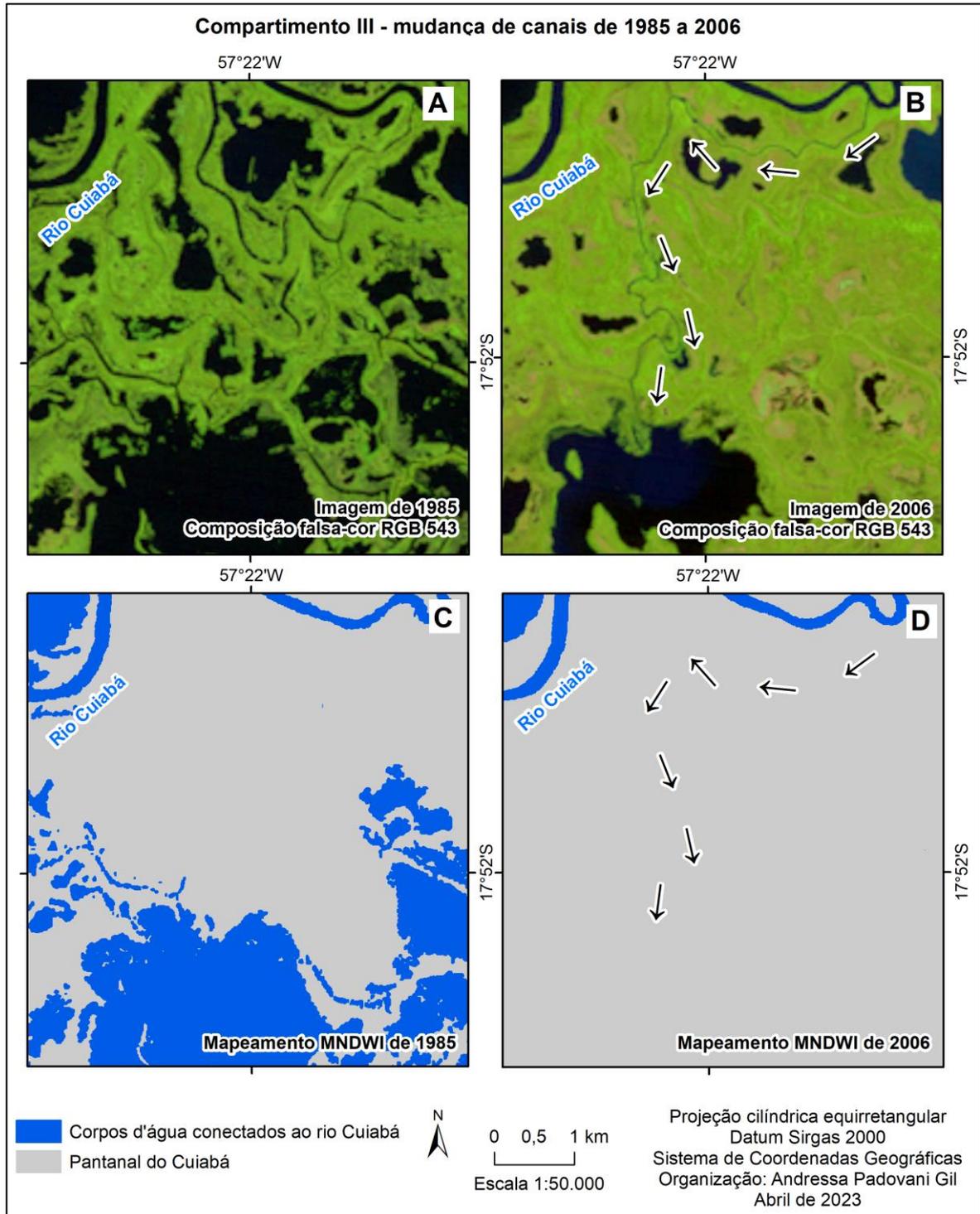
O Quadro A da Figura 9 apresenta a composição falsa-cor da imagem, na qual pode-se observar todo o traçado de um estreito canal, identificado pelas setas na cor preta, podendo observar ainda que este canal se subdivide em outros canais e se conecta a pequenas lagoas na planície no sentido sudoeste. No quadro B da Figura 9, observam-se falhas no traçado deste canal, que vai apenas até a conexão com a lagoa, inexistindo a continuação do canal nos pontos das duas setas pretas abaixo. Já o quadro C da Figura 9 apresenta uma imagem do *Google Earth*

para outra data, onde observa-se que o canal em questão aparentemente cessa sem desaguar em uma lagoa ou outro corpo d'água (local apontado pela seta preta), indicando que pode se tratar de um canal intermitente que é reativado em períodos de cheia.

Segundo analisado por Adamoli (1995), do ponto de vista da dinâmica das águas superficiais, a drenagem do Pantanal se organiza em linhas subparalelas, constituídas por canais atuais e paleocanais episódicos ou abandonados. Nos períodos de cheias, os paleocanais funcionam como coletores de água, distribuindo as inundações ao receber água dos rios ou da precipitação local. Esta complexidade da rede hídrica também pôde ser observada nos mapeamentos realizados pelo MNDWI, podendo identificar canais presentes em uma data e não na outra.

A Figura 10 apresenta com clareza a mudança no traçado de canais em imagens de 1985 e de 2006. Nos quadros A e C da Figura 10 é possível observar a imagem em composição falsa-cor e o mapeamento MNDWI para 1985, respectivamente, nas quais observa-se a presença de canais desconexos a sul do rio Cuiabá. Na mesma Figura 10, na imagem em composição falsa-cor apresentada no quadro B para a imagem de 2006, é possível observar um único e estreito canal contínuo, partindo de um ponto de arrombamento da margem esquerda do rio Cuiabá e fluindo em direção a sudoeste, tendo as setas pretas como indicação de seu traçado. No quadro D da Figura 10 que apresenta o mapeamento MNDWI para a mesma imagem de 2006, se observa a inexistência do mapeamento deste canal, indicando com as setas pretas onde ele deveria estar representado. Esta figura reforça a limitação do MNDWI para mapear canais estreitos.

Figura 10 - Compartimento III – mudança de canais de 1985 a 2006



Fonte: Organização: Andressa Padovani Gil (2023).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos nessa pesquisa possibilitaram a compreensão da dinâmica das inundações no Pantanal do Cuiabá, sendo possível identificar os pontos principais de avulsão

do rio Cuiabá e de conexão de suas águas com as áreas inundadas na planície. O mapeamento gerado pelo MNDWI apresentou resultados satisfatórios para o mapeamento dos corpos d'água, porém com limitações de aplicabilidade para uma área úmida tão complexa quanto o Pantanal. Os principais pontos positivos da metodologia utilizada foram a automatização do processo de mapeamento, pois se tratando de uma área tão extensa e de um longo período analisado (33 anos), seria inviável realizar o mapeamento manual de cada imagem individualmente. Além disso, a dificuldade de acesso à planície pantaneira em períodos de cheia também se constitui um fator limitante para mapeamentos presenciais.

As principais dificuldades e limitações encontradas na pesquisa foram a separação do solo e da vegetação úmidos com corpos d'água, visto que há algumas áreas de solo úmido que o MNDWI mapeia como se fosse água. Além disso, no Pantanal há grandes áreas que ficam inundadas no período de cheia e que se encontram cobertas de vegetação aquática, podendo mascarar a presença de água e comprometer o seu mapeamento, visto que a vegetação possui respostas espectrais diferentes da água. O mapeamento de canais estreitos é outro fator limitante, como corixos e vazantes que são abundantes no Pantanal. Muitas vezes, a conectividade entre os rios principais e as lagoas, baías e áreas inundadas na planície é feita através desses canais, que não foram satisfatoriamente mapeados principalmente por conta das limitações técnicas da resolução espacial das imagens orbitais (de 30 metros).

A identificação do que são os corpos d'água extravasados do rio Cuiabá e de outros rios também é um importante limitante da pesquisa, poisas áreas de confluência no Pantanal são marcadas por intensa mistura de água de ambos os rios com outros corpos d'água inundados na planície, o que impossibilita uma identificação mais assertiva da origem dessas águas. E por fim, a presença de nuvens sobre trechos do rio ou das áreas inundadas é um problema comum quando se utilizam imagens orbitais, sendo um fato já esperado, especialmente por ter se trabalhado com o período coincidente com a maior pluviosidade.

Sugere-se que sejam realizados em trabalhos futuros, campanhas de campo para validação dos mapeamentos da inundação no Pantanal, bem como para obter informações mais detalhadas sobre a dinâmica hídrica que somente são possíveis de obtenção a partir de uma observação *in loco*, como a verificação das áreas de rompimento da margem do rio, conectividade com outros rios e demais corpos d'água da planície, entre outros.

REFERÊNCIAS

ADAMOLI, J. **Diagnóstico do Pantanal: características ecológicas e problemas ambientais**. Brasília: PNMA, 1995.

AGÊNCIA NACIONAIS DE ÁGUAS – ANA. Séries históricas de estações. **Portal Hidroweb**. 2019. Disponível em: http://www.snirh.gov.br/hidroweb/publico/medicoes_historicas_abas.jsf. Acesso em: 25 de abr. 2019.

ASSINE, M.L. **Sedimentação na Bacia do Pantanal Mato-Grossense, Centro-Oeste do Brasil**. 2003. Tese (Livre-Docência em Geociências e Meio Ambiente) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2003.

BRASIL. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Plano de Recursos Hídricos da Região Hidrográfica do Paraguai - PRH Paraguai**. Resumo Executivo: Agência Nacional das Águas. Brasília: ANA, 2018.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente, dos Recursos Hídricos e da Amazônia Legal. **Plano de conservação da Bacia do Alto Paraguai (PCBAP)**. Brasília, DF: PNMA, 1997.

BRASIL. Ministério das Minas e Energia. Departamento Nacional da Produção Mineral. **Projeto RADAM BRASIL**. Folha SD-21 Cuiabá: Geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra. Rio de Janeiro, 1982.

CORRADINI, F. A. **Geomorfologia fluvial, mudanças ambientais e evolução do Megaleque do rio São Lourenço, quaternário do Pantanal mato-grossense**. 2011. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2011.

CPRM. **Previsão hidrológica e alerta de enchentes: Pantanal Mato-Grossense**. Disponível em: https://www.cprm.gov.br/sace/index_bacias_monitoradas.php?getbacia=bparaguaiBoletins#. Acesso em: 20 de mar. de 2020.

CUNHA, C. N.; JUNK, W. J. Parte II: A Classificação dos Macrohabitats do Pantanal Mato-grossense. *In*: CUNHA, C. N.; PIEDADE, M. T. F.; JUNK, W. J. (org.). **Classificação e delineamento das áreas úmidas brasileiras e de seus macrohabitats**. Cuiabá: EdUFMT, 2014.

FLORENZANO, T. G. Sensoriamento remoto para Geomorfologia. *In*: FLORENZANO, T. G. (org.). **Geomorfologia, conceitos e tecnologias atuais**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.

GIL, A. P. **Contribuição da bacia hidrográfica do rio Cuiabá para as inundações do Pantanal, no período de 1985 a 2018**. 2022. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Geografia) - Programa de Pós-Graduação em Geografia. Universidade do Estado de Mato Grosso, Cáceres, 2022.

GIL, A. P.; PADOVANI, C. R.; COELHO, A. L. N. Comparação entre NDWI e MNDWI para o mapeamento de áreas inundadas no Pantanal do Taquari. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 19., 2019, Campinas. **Anais [...]**. Campinas: USP, 2019. [S. p.]. Disponível em: <https://proceedings.science/sbsr-2019/papers/comparacao-entre-ndwi-e->

mndwi-para-o-mapeamento-de-areas-inundadas-no-pantanal-do-taquari. Acesso em: 4 maio. 2020.

MACEDO, H. A. **Evolução geomorfológica e dinâmica hidrossedimentar da Planície fluvial Paraguai-Corumbá, quaternário do Pantanal**. 2017. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2017.

MCFEETERS, S.K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. **International Journal of Remote Sensing**, [S. l.], v. 17, n. 7, p. 1425-1432, 1996.

MERINO, E. R. **Caracterização geomorfológica do sistema deposicional do rio Miranda (borda sul do Pantanal mato-grossense, MS) com base em dados orbitais**. 2011. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2011.

MIOTO, C. L.; FILHO, A. C. P.; ALBREZ, E. A. Contribuição à caracterização das sub-regiões do Pantanal. **Revista Entre-Lugar**, Dourados-MS, v. 3, n.6, p. 165 - 180, dez. 2012.

PADOVANI, C. R. **Dinâmica espaço-temporal das inundações do Pantanal**. 2010. Tese (Doutorado em Ecologia Aplicada) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Centro de Energia Nuclear na Agricultura. Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.

PUPIM, F. N. **Geomorfologia e paleo-hidrologia dos megaleque dos rios Cuiabá e São Lourenço, quaternário da bacia do Pantanal**. 2014. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2014.

ROSA, R. Geotecnologias na Geografia aplicada. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, v. 16, n. 1, p. 81-90, abr. 2005.

SILVA, A. **Geomorfologia do megaleque do rio Paraguai, quaternário do pantanal mato-grossense, Centro-Oeste do Brasil**. 2010. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2010.

SILVA, J. S. V.; ABDON, M. M. Delimitação do Pantanal brasileiro e suas sub-regiões. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 33, n. 1, p. 1703-1711, out. 1998.

XU, H. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. **International Journal of Remote Sensing**, [S. l.], v. 27, n. 14, p. 3025-3033, 2006.

ZANI, H. **Mudanças morfológicas na evolução do megaleque do Taquari: uma análise com base em dados orbitais**. 2008. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Geociência e Meio Ambiente) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2008.

ZANI, H.; ASSINE, M. L.; SILVA, A.; CORRADINI, F. A.; KUERTEN, S.; GRADELLA, F. S. Geoformas deposicionais e feições erosivas no Pantanal mato-grossense identificadas por sensoriamento remoto. **Geografia** [S. l.], v. 34, número especial, p. 643-654, 2009.

ZARISTA, S. Monitoramento da dinâmica de inundação no Pantanal norte com uso de índices EVI e LSWI do Modis. 2013. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Física Ambiental) - Instituto de Física. Universidade Federal do Mato Grosso, Cuiabá, 2013.