

Avaliação do uso de imagens Planet para o mapeamento de áreas úmidas na Bacia do Alto Paraguai

Assessment of Planet imagery use for wetland mapping in the Alto Paraguay Basin

Mariana Dias Ramos*, Eduardo Reis Rosa**, Marcos Reis Rosa***, Helga Correa Wiederhecker****

* ArcPlan, mariana@arcplan.com.br

** ArcPlan, eduardo@arcplan.com.br

*** ArcPlan, mrosa@arcplan.com.br

**** WWF – Brasil, helgacorreia@wwf.org.br

<https://doi.org/10.5380/raega.v63i2.99611>

Resumo

O presente estudo investiga a aplicação dos mosaicos mensais da Planet/NICFI para o mapeamento da superfície de água e demais áreas úmidas na região brasileira da Bacia Hidrográfica do Alto Paraguai (BAP) para o período de janeiro de 2021 a abril de 2024. O mapeamento foi realizado por meio de técnicas de classificação de imagens, baseada em aprendizado de máquina e processamento com computação em nuvem. O estudo demonstrou a capacidade dessas imagens em fornecer informações detalhadas sobre a superfície de água na BAP, especialmente na região de planalto, para a identificação de novos corpos d'água. Além disso, o mapeamento de superfície de água foi satisfatório para monitorar a variação mensal do pulso de inundação na planície. No entanto, o estudo identificou limitações espectrais do sensor Planet, resultando em menor sensibilidade para o mapeamento de áreas úmidas para além da superfície de água. Os resultados indicam que os mosaicos mensais da Planet/NICFI são uma ferramenta promissora para o monitoramento da superfície de água na BAP, especialmente como forma de adicionar detalhes em escala local quando comparados aos mapeamentos existentes com outras fontes de imagens orbitais. A análise temporal dos dados ainda revelou que 2023 foi o ano com maior volume de água no período estudado, enquanto os primeiros meses de 2024 indicam uma forte tendência de seca, mostrando o potencial do fluxo de processamento adotado como ferramenta para detecção precoce de tendências de seca e inundações.

Palavras-chave:

Pantanal, Classificação supervisionada, Google Earth Engine, Mosaicos NICFI, Pulso de inundação.

Abstract

This study investigates the application of Planet/NICFI monthly mosaics for monthly mapping of surface water and other wetlands in the Brazilian region of the Upper Paraguay River Basin (BAP) from January 2021 to April 2024. The mapping was carried out through image classification techniques, based on machine learning and cloud computing processing. The study demonstrated

the capacity of these images to provide detailed information on the water surface in the BAP, especially in the plateau region, for the identification of new water bodies. Furthermore, the surface water mapping was satisfactory for monitoring the monthly variation of the flood pulse in the floodplain. However, the study identified spectral limitations of the Planet sensor, resulting in lower sensitivity for mapping wetlands beyond the water surface. The results indicate that the Planet/NICFI monthly mosaics are a promising tool for monitoring the water surface in the BAP, especially as a way to add detail at the local scale when compared to existing mappings with other orbital image sources. The temporal analysis of the data also revealed that 2023 was the year with the highest volume of water in the period studied, while the first months of 2024 indicate a strong trend of drought, showing the potential of the adopted processing flow as a tool for early detection of drought and flood trends.

Keywords:

Pantanal, Supervised classification, Google Earth Engine, NICFI mosaics, Flood pulse.

I. INTRODUÇÃO

A Região Hidrográfica do Paraguai (RH-Paraguai), ou a porção brasileira da Bacia do Alto Paraguai (BAP), uma das doze regiões hidrográficas brasileiras, está localizada nos estados do Mato Grosso e Mato Grosso do Sul e ocupa uma área aproximada de 362 000 km². A BAP pode ser dividida em duas principais regiões geomorfológicas: área de Planície, que é equivalente ao bioma Pantanal; e a área de Planalto, composta por partes dos biomas Cerrado (80%) e Amazônia (20%) (Figura 1A).

A região da Planície é considerada a maior área úmida continental do planeta (*wetlands*), reconhecida pela Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura (Unesco) como Patrimônio Natural da Humanidade e Reserva da Biosfera desde o ano 2000 (UNESCO, 2000). O Pantanal é um reduto de biodiversidade sendo, proporcionalmente, o bioma brasileiro mais preservado, somado ao fato de ser uma zona de convergência biogeográfica entre os domínios da Mata Atlântica, Cerrado, Amazônia e do Chaco (Junk et al., 2006). A planície pantaneira apresenta uma dinâmica singular de difusão horizontal da enchente, chamada de pulso de inundação, na qual o alagamento sazonal pode atingir uma área de até 70% da planície, resultando em um complexo de paisagens únicas que proporcionam a coexistência de fauna e flora tanto aquáticas quanto terrestres (Alho; Sabino, 2012; Brasil, 1979; Resende, 2008).

Já a região do Planalto, que compõe a BAP, tem atualmente mais de 60% da sua área destinada ao uso agropecuário. Segundo os dados da Coleção 8 do MapBiomas (MAPBIOMAS, 2023) a vegetação nativa teve uma redução equivalente a cerca de 40% desde 1985 (Figura 1B), com perda superior a 5 milhões de hectares. A vegetação remanescente dessa região é predominantemente savânica e está concentrada em áreas de preservação permanente, reservas legais e de relevos mais acidentados. Dentre as ameaças e vetores de

degradação da bacia como um todo pode-se citar a deterioração de nascentes, em especial pelo rebaixamento do lençol freático devido ao uso excessivo da água e pela falta de mata ciliar nas cabeceiras de drenagem (Oliveira; Calheiros; Hamilton, 2019; Roque et al., 2016), além da instalação de pequenas centrais hidrelétricas, drenos e atividade de garimpo do ouro ao longo do curso dos rios (Cunha et al., 2023).

Apesar de distintas, as duas sub-regiões são interdependentes uma vez que todos os rios que desaguam no curso do rio Paraguai ao longo da Planície, têm suas nascentes no Planalto da BAP. Sendo assim, para um entendimento sobre as inundações do Pantanal deve-se compreender também a área das nascentes que estão no Planalto, onde se origina grande parte das águas e dos sedimentos que chegam e permanecem na Planície (Assine et al., 2015).

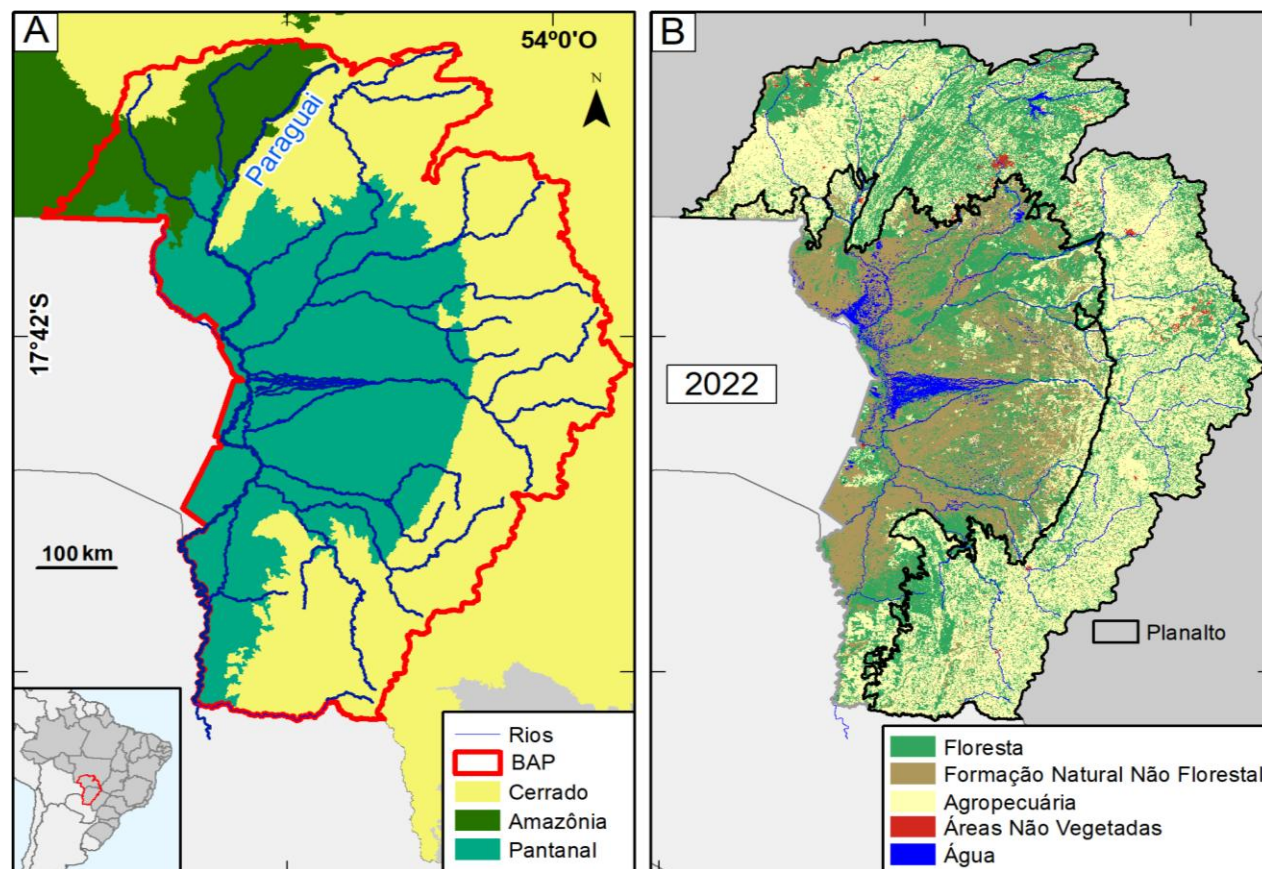


Figura 1 – Localização da Bacia do Alto Paraguai (BAP); A) Distribuição dos rios e biomas brasileiros na bacia; B) Subdivisão das regiões de Planície e Planalto; Mapa de Cobertura e Uso da Terra para o ano de 2022 segundo o MapBiomas (2023).

As ciências de observação da Terra têm experimentado avanços significativos em relação a novas fontes de dados e infraestrutura para o processamento. Um exemplo é a incorporação e o uso de nanossatélites em estudos hídrico e análises espaciais de séries temporais, auxiliado pelo processamento automatizado dos dados. Esses satélites, de dimensões e peso reduzidos (1 – 10kg), em comparação aos satélites tradicionais, são projetados para orbitar em constelações numerosas, com o objetivo de superar as lacunas de resolução

temporal, além de oferecer maior resolução espacial (Carvalho Júnior, 2018; Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2011). A maior constelação de nanossatélites atualmente é a da empresa Planet Labs, com mais de 200 sistemas sensores PlanetScope em órbita (Strick et al., 2019). Apesar de documentadas limitações em relação a resolução espectral e calibração entre os sensores da constelação (Frazier; Hemingway, 2021), as imagens Planet alcançam mérito no monitoramento de eventos sazonais (Valman et al., 2024). No que se refere ao estudo e monitoramento dos recursos hídricos, as imagens Planet já foram utilizadas em diversas pesquisas, como a quantificação de carga e fluxo de sedimentos (Strick et al., 2019), o monitoramento de nível de água (Ehret et al., 2021; Karaman, 2022), estudos batimétricos em águas rasas (Poursanidis et al., 2019), monitoramento da dinâmica de inundação de lagoas (Cooley et al., 2019) e qualidade da água (Mansaray et al., 2021).

Para explorar os dados espaço-temporais provenientes de nanossatélites, alternativas como o processamento de imagens utilizando computação em nuvem e aprendizado de máquina se mostram promissoras (Barbosa; Novo; Martins, 2019; Ramos et al., 2023). A computação em nuvem representa uma inovação para o geoprocessamento, especialmente em trabalhos que exigem a manipulação de grandes volumes de dados ou o uso de imagens orbitais. Essa tecnologia otimiza o tempo e permite a aplicação de diversas escalas de abrangência e estudos ainda não testados (Barbosa; Novo; Martins, 2019; Carvalho Júnior, 2018; Gorelick et al., 2017).

A BAP abriga uma diversidade de áreas úmidas distribuídas nas sub-regiões de Planalto e Planície. Considerando a importância de mapear e monitorar esses recursos, a incorporação de novas fontes de dados orbitais e fluxos de processamento podem representar ganho de informação espacial e temporal dessas áreas (Ramos et al., 2023). Seguindo esta vertente, este trabalho teve como objetivo o mapeamento de série temporal mensal das áreas úmidas na BAP com imagens de alta resolução temporal e espacial e processamento em nuvem.

II. MATERIAIS E MÉTODOS

O método de mapeamento e processamento dos dados foi orientado por sub-região, considerando que no Planalto existe a predominância de ocorrência da água em forma de rios perenes, represas e açudes, enquanto na Planície há a predominância de rios mais largos e intermitentes, além de áreas sazonalmente alagadas. Assim, o foco na Planície foi o mapeamento das áreas afetadas pelo pulso de inundação, seja da

vegetação alagada ou da lâmina de superfície de água, enquanto no Planalto o mapeamento foi referente a superfície de água dos rios da bacia, ambos para o período de janeiro de 2021 a abril de 2024.

O processamento envolveu classificação supervisionada baseada no algoritmo de aprendizado de máquina *Random Forests* (RF) (Breiman, 2001) dentro da plataforma de computação em nuvem do Google Earth Engine (GEE), conforme adaptação dos métodos utilizados em Souza et al. (2020) e sugeridos por Ramos et al. (2023). O processamento envolve quatro principais etapas: a coleta e treinamento de amostras; a classificação supervisionada do algoritmo; a remoção de ruídos via aplicação de filtros de dados; e a geração de estatísticas de frequência e área total. Cada sub-região seguiu um fluxo de processamento específico conforme ilustrado nos fluxogramas da Figura 2.

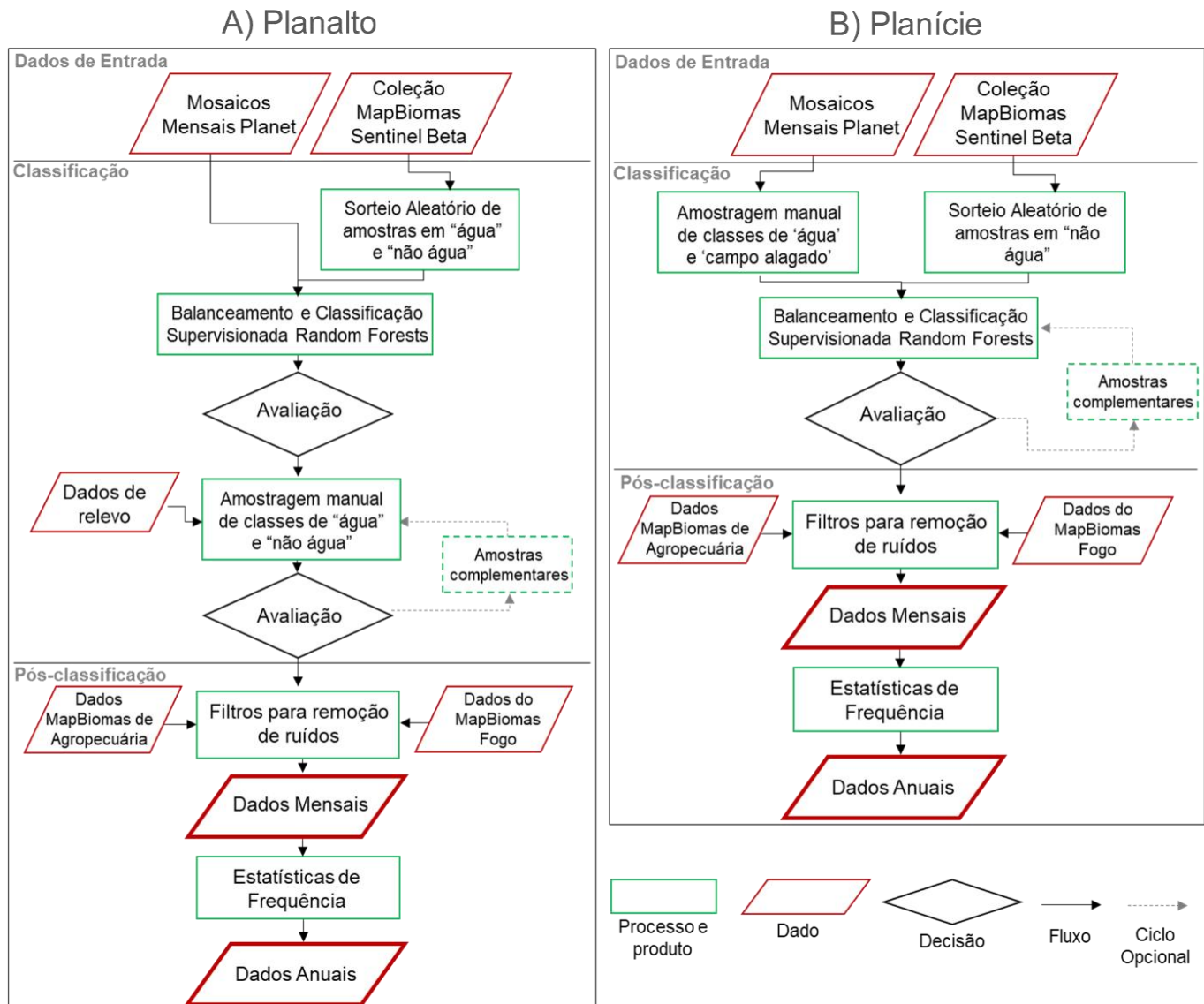


Figura 2 – Fluxograma dos materiais e métodos utilizados dentro da plataforma do GEE para a Bacia do Alto Paraguai (BAP); A) Fluxograma aplicado na região do Planalto; B) Fluxograma aplicado da região da Planície.

Dados de entrada

Através do programa *Norway's International Climate and Forests Initiative* - NICFI (NICFI, 2025), mosaicos mensais, feitos com imagens diárias Planet, estão disponíveis para acesso público desde janeiro de 2021. Esses mosaicos garantem um imageamento livre de nuvens de toda a região tropical, com resolução espacial de 5 metros nas bandas do vermelho (Red), verde (Green), azul (Blue) e infravermelho próximo (NIR) (Planet Labs PBC, 2024), podem ser acessados na plataforma do GEE e foram as imagens utilizadas para a base do mapeamento.

Outro dado de entrada no processamento foram os mapas anuais de uso e cobertura da terra do projeto MapBiomas feitos com imagens do satélite Sentinel 2 (Coleção Beta), de resolução espacial de 10 metros. Os *pixels* estáveis, isto é, os *pixels* que não apresentaram alteração de classe ao longo dos anos mapeados pelo MapBiomas, referentes às classes de 'água', 'campo alagado' e demais classes 'não água' foram selecionados e orientaram um sorteio de amostras para o treinamento do classificador.

Baseado em interpretação visual dos mosaicos, também foram coletadas amostras manuais de áreas de 'água', 'campo alagado' e 'não água', especialmente em áreas sazonalmente alagadas. A coleta manual de amostras também foi realizada dentro do fluxo de coleta de amostras complementares para gerar novas versões do mapeamento. As amostras de treinamento consistiram em 2000 pontos sorteados para cada classe 'água', 'campo alagado' e 'não água'.

Classificação

Após a coleta de amostras com base nos mosaicos Planet/NICFI o classificador RF foi treinado. O RF gera uma série de árvores de decisão construídas por regressões baseadas no comportamento espectral das amostras (Breiman, 2001). Em seguida, o classificador foi aplicado a todos os mosaicos mensais, rotulando qualitativamente cada pixel de entrada em relação à sua respectiva classe. No caso do Planalto, dados de relevo SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) também foram inseridos dentro do espaço de características de treinamento do classificador, e as classes de saída dos *pixels* foram 'água' e 'não água'. Já para a Planície, as classes de saída foram 'não alagado', 'água' e 'campo alagado', esta última se refere às áreas alagadas cobertas com vegetação herbácea nas zonas de transição aquática e terrestre (Cunha et al., 2023).

Após o primeiro resultado do mapeamento, o dado foi avaliado por meio de interpretação visual e, quando necessário, entrou em um ciclo de aprendizagem por reforço, que envolve melhoramento de quantidade e qualidade de amostras, isto é, aumento de amostras complementares dos distintos padrões de

áreas alagadas e não alagadas, com o intuito de o algoritmo diferenciar melhor os alvos e elaborar mapas com menores índices de comissão e omissão (Olofsson et al., 2014).

Pós classificação

Depois de finalizado o processamento com o RF, foram aplicados alguns filtros para a remoção de ruídos no processo pós-classificação. Em primeiro lugar, foi aplicado o filtro espacial do tipo moda para reduzir o efeito sal e pimenta da classificação, além de remover *pixels* isolados. Em seguida foram utilizados dados do projeto MapBiomass (2023) para a redução da comissão do produto bruto do classificador, com os dados de cicatrizes de queimadas do Monitor do Fogo (baseado em Sentinel 2) e os dados de agropecuária dos mapas de cobertura e uso da terra do MapBiomass Coleção 8 (2023), etapa que se fez necessária devido a dificuldades de separação de algumas feições por parte da limitação espectral e radiométrica das imagens do sensor PlanetScope.

Uma vez gerados os mapas mensais e removidos os ruídos, foram calculadas estatísticas de área mapeada e de frequência de alagamento, o dado de frequência foi essencial para gerar mapas e dados anuais, isto é, mapas que representassem áreas alagadas por pelo menos seis meses em cada ano.

A validação do mapeamento foi feita por interpretação visual em tela em todas as datas mapeadas com base nos mosaicos Planet/NICFI. Para a região do Planalto, a validação visual considerou, adicionalmente, imagens de alta resolução espacial disponíveis na base de dados do software Google Earth (Google LLC, 2023).

Os mapas e estatísticas gerados também foram analisados em comparação com dados públicos auxiliares que cobrem a região da BAP, produzidos pelo projeto MapBiomass. Os dados anuais de superfície de água para o Planalto, feitos com imagens Sentinel e Landsat, foram extraídos diretamente da plataforma do projeto. Já os dados mensais de superfície de água e campo alagado da Planície, feitos com imagens Landsat, foram disponibilizados pelo MapBiomass (Coleção 8) sob demanda após contato e solicitação do dado; não há dados públicos mensais baseados em imagens Sentinel para a BAP. Esses dados auxiliares foram utilizados para comparar visualmente e quantitativamente com os resultados do mapeamento feito com os mosaicos Planet/NICFI.

III. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Processamento dos mosaicos

Algumas regiões apresentaram a presença sistemática de ruídos, especialmente devido à confusão com áreas de cicatriz de queimada e de solo exposto no contexto do manejo agrícola. Para mitigar esse problema, foram utilizados dados de áreas mapeadas como cicatriz de queimada e agricultura, disponibilizados pelo

MapBiomias (2023), a fim de remover as classificações indevidas de ‘superfície de água’ na região do Planalto. Observou-se que o erro de comissão ocorreu de forma mais intensa em certas áreas do que em outras, corroborando estudos como os de Valman et al. (2024), que apontam para uma maior dificuldade dos classificadores de *machine learning* aplicados a imagens Planet em regiões com alta diversidade de alvos, como áreas urbanas e antropizadas. Além disso, foram identificadas variações na harmonização ao longo dos pixels que compõem o mosaico mensal, alinhando-se às observações de Frazier e Hemingway (2021) que discutem os desafios da resolução radiométrica e de calibração entre os satélites da constelação PlanetScope, resultando na falta de padronização dos valores de pixels em grandes regiões de interesse. Os mosaicos Planet possuem as bandas do vermelho, verde, azul e infravermelho próximo, enquanto o satélite Landsat 8 consegue capturar o sinal espectral das mesmas bandas Planet e ainda outros sete comprimentos de onda.

Apesar dessas limitações, é preciso ressaltar a importância da produção e acessibilidade dos mosaicos Planet/NICFI, inclusive associados à alta performance de processamento de plataformas em computação em nuvem, os quais podem gerar os resultados discutidos adiante. Estes podem ser considerados os primeiros mapas de superfície de água de alta resolução espacial para todo o limite brasileiro da BAP (Figura 3). A Figura 3 exemplifica áreas de comparação entre o mapeamento feito com dados dos satélites Planet e Landsat, destacando o ganho de informação proporcionado pela resolução espacial. No recorte A, observa-se o mapeamento de um tributário do rio Coité no Planalto, além de feições de meandros abandonados. No recorte B, o mapeamento com dados do Planet destaca melhor a superfície de água nas regiões de vazantes do megaleque do Taquari. Já no recorte C, são evidenciados canais de água abandonados ao longo do rio Paraguai.

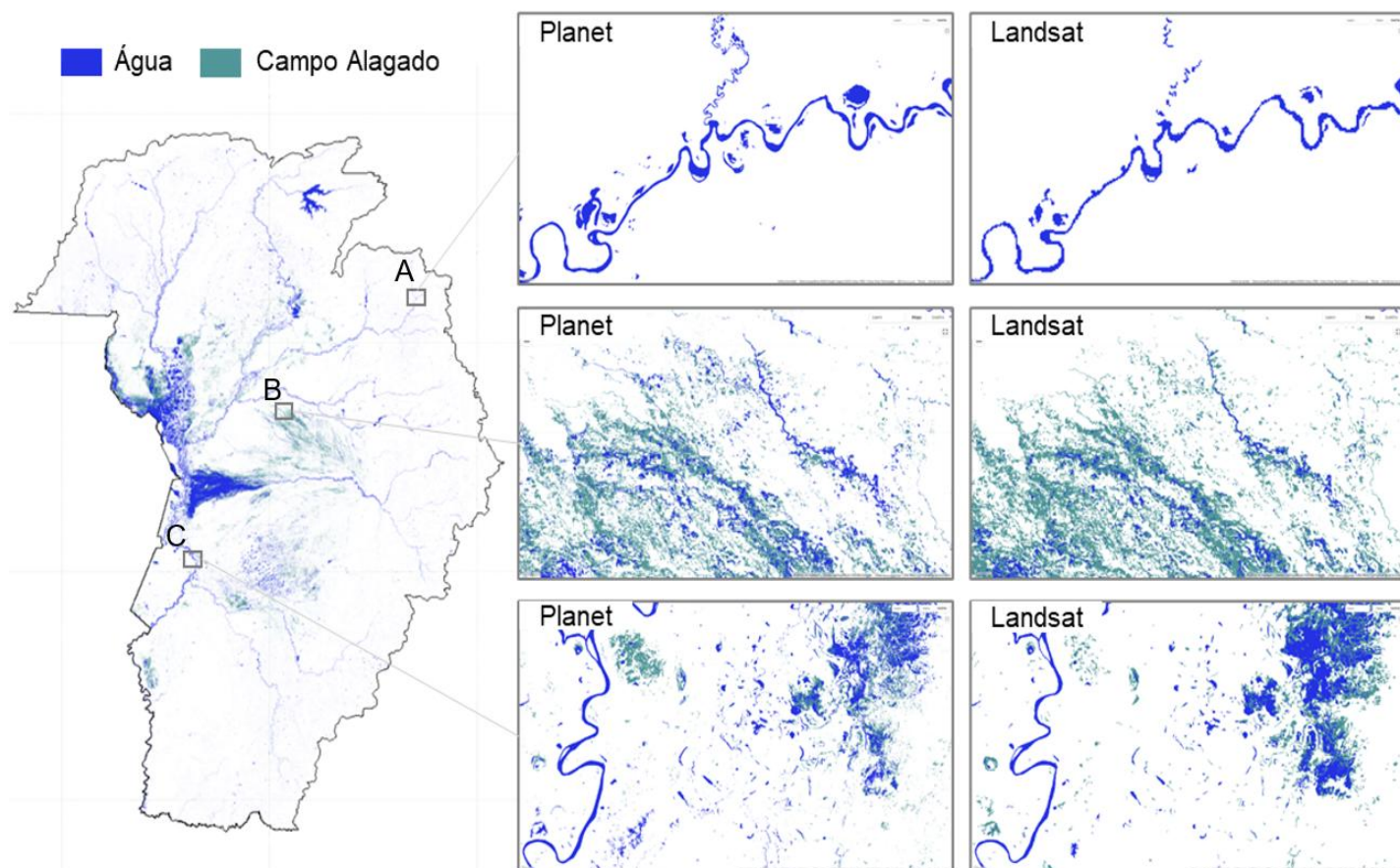


Figura 3 – Resultado do mapeamento e comparação dos produtos Landsat (MapBiomas, 2023) e Planet para a Bacia do Alto Paraguai (BAP). Em azul é a classificação de Água, em verde claro é a classificação de Campo Alagado e em Branco são áreas não mapeadas.

Mapeamento da Planície

Na Planície, os dados mensais de água e campo alagado são essenciais para mapear o pulso de inundação. Quando comparados os valores de área mapeada dessas duas classes com os dados mensais do MapBiomas, gerados com Landsat (30 metros de resolução espacial), observa-se uma discrepância significativa entre a área total mapeada, em especial nos meses do primeiro semestre de cada ano analisado, e com discrepância maior em anos mais úmidos, como em 2023 (Figura 4A). No entanto, quando o dado é individualizado por classe mapeada, observa-se que as divergências estão relacionadas à classe de campo alagado. Ao observar apenas os valores da classe 'água', nota-se alta correlação e alinhamento do pulso de inundação mapeado por ambas as fontes, com um incremento de área no mapeamento com imagens Planet (Figura 4B).

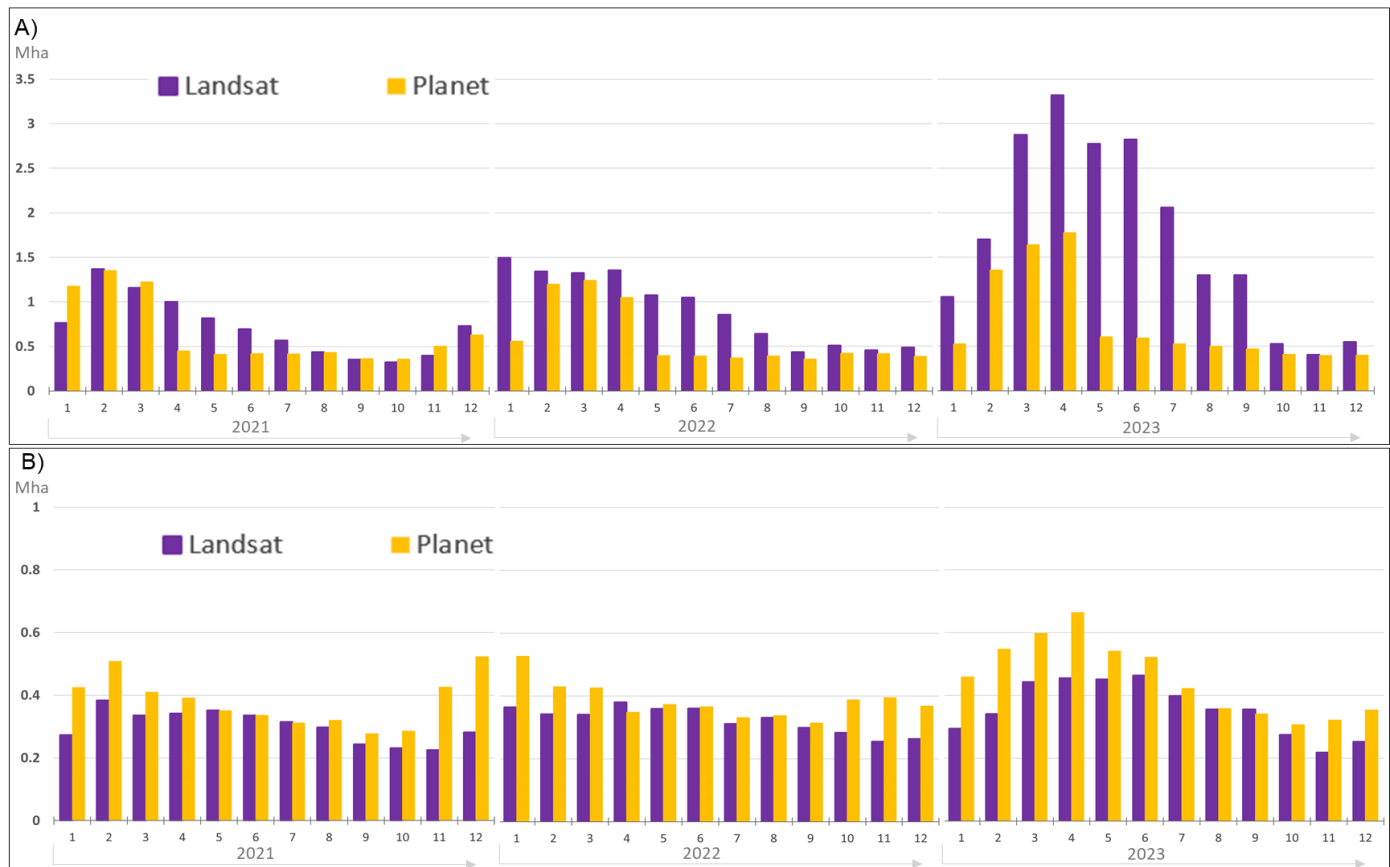


Figura 4 – Comparação da área das classes mapeadas com produtos Landsat (MapBiomias, 2023) e Planet para a Bacia do Alto Paraguai (BAP); A) Somatória da área considerando as classes 'água' e 'campo alagado'; B) Somatória da área considerando apenas a classe 'água'.

Essas diferenças de mapeamento entre os dois sensores se deram principalmente devido às resoluções espectrais dos satélites Planet e Landsat. A superfície de água consegue ser bem mapeada nas imagens Planet, especialmente devido a diferença de reflectância entre as bandas do infravermelho próximo e do verde, porém, a umidade presente no meio da vegetação, na área chamada de 'campo alagado', não apresenta um mapeamento consistente, o que é melhor discriminado nas imagens Landsat 8. Tal fato pode ser explicado pela limitação espectral devida à ausência das bandas do infravermelho de ondas curtas (SWIR 1: 1,57–1,65 μm e SWIR 2: 2,11–2,29 μm) nos mosaicos Planet/NICFI, e presente no Landsat, as quais possibilitam a melhor diferenciação de áreas de mistura de alvos, especialmente na identificação da vegetação alagada, permitindo um mapeamento mais assertivo (Gao, 1995; Xu, 2005; Chandrasekar et al., 2010).

Como resultado, observa-se uma inconsistência no mapeamento em áreas de vegetação alagada, nos meses de cheia, há regiões bem mapeadas e outras com comissão da classe campo alagado em áreas de solo exposto. Na Figura 5 observa-se o resultado do mapeamento e comparação com Landsat para um mês de cheia, abril de 2023, a classe de campo alagado (em verde) apresenta uma maior quantidade de área mapeada do que

a classe de água (em azul) no mapeamento com Planet. Porém, grande parte do mapeamento de campo alagado excedente é comissão com áreas de solo enquanto a superfície de água apresentou boa correlação com a imagem de satélite.

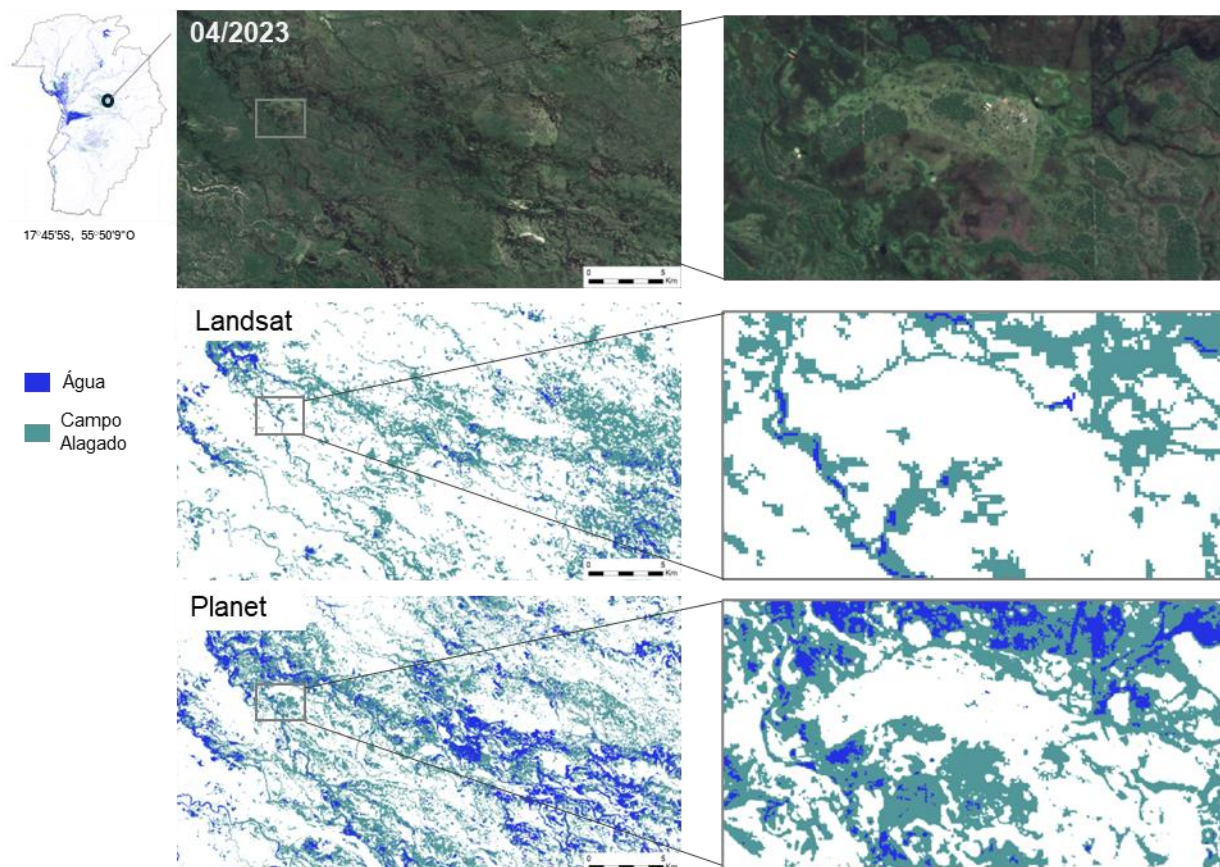


Figura 5 – Comparação da área das classes mapeadas com produtos Landsat (MapBiomas, 2023) e Planet para Planície da BAP em áreas de comissão da classe ‘campo alagado’. Em azul é a classificação de Água, em verde claro e a classificação de Campo Alagado e em Branco são áreas não mapeadas.

Ao mesmo tempo, regiões com a maior presença de vegetação permanentemente alagada, como áreas próximas ao rio Paraguai, apresentam omissão no mapeamento da classe ‘campo alagado’. A Figura 6 exemplifica essa relação, quando comparado com a classificação Landsat, a classificação Planet evidencia áreas de superfície de água (em azul), mas deixa de mapear extensas áreas de macrófitas aquáticas (campo alagado em verde) na região do Parque Nacional do Pantanal Mato-grossense. Assim, indica-se o uso da classificação mensal para a Planície do Pantanal feita com imagens Planet apenas referente às áreas de ‘superfície de água’ pois apresentaram ganhos em relação ao mapeamento com Landsat, além de apresentarem consistência espacial e temporal coerentes em relação ao pulso de inundação do Pantanal dentro do período observado.

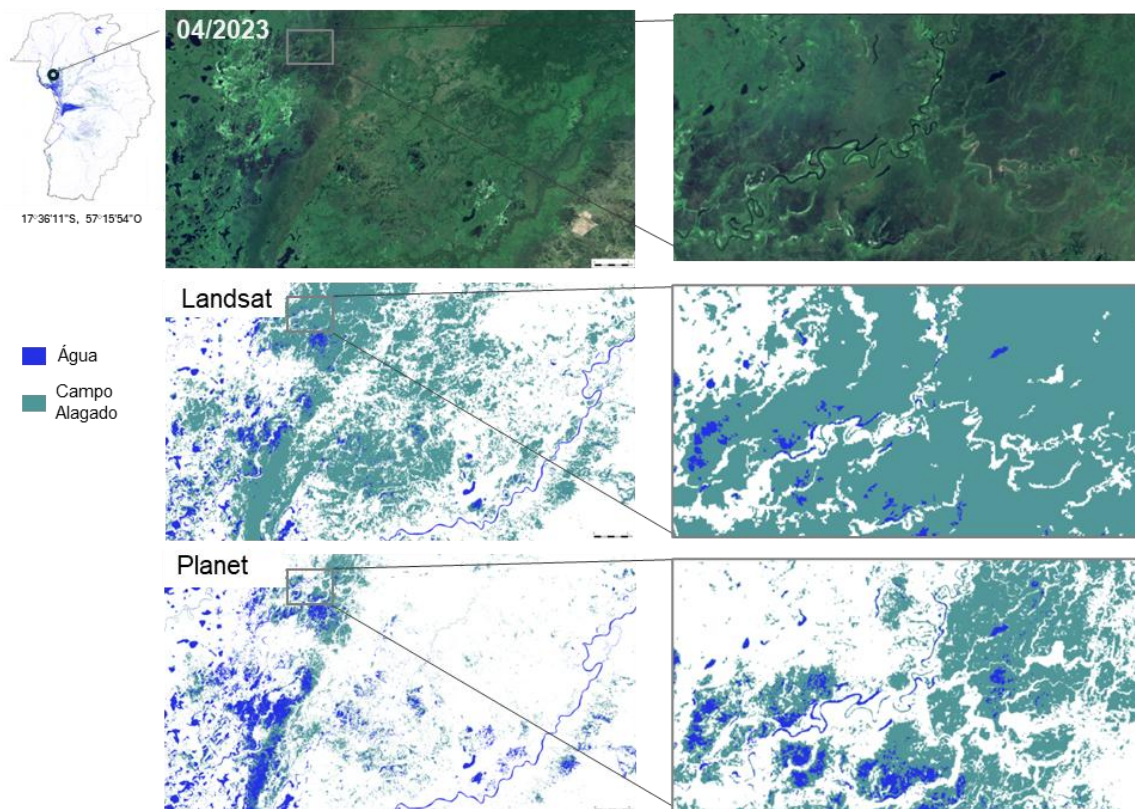


Figura 6 – Comparação da área das classes mapeadas com produtos Landsat (MapBiomas, 2023) e Planet para Planície da BAP em áreas de omissão da classe 'campo alagado'. Em azul é a classificação de Água, em verde claro e a classificação de Campo Alagado e em Branco são áreas não mapeadas.

Analisando os dados de superfície de água para o período de janeiro de 2021 a abril de 2024 observa-se que os picos de cheia e seca aconteceram entre os meses de outubro a abril e maio a setembro, respectivamente. O ano de 2023 teve a maior cheia observada, atingindo seu pico no mês de abril com mais de 660 mil ha de superfície de água mapeados, enquanto abril de 2024 atingiu apenas 430 mil ha de água (Figura 7), uma redução de 35% em relação ao ano anterior.

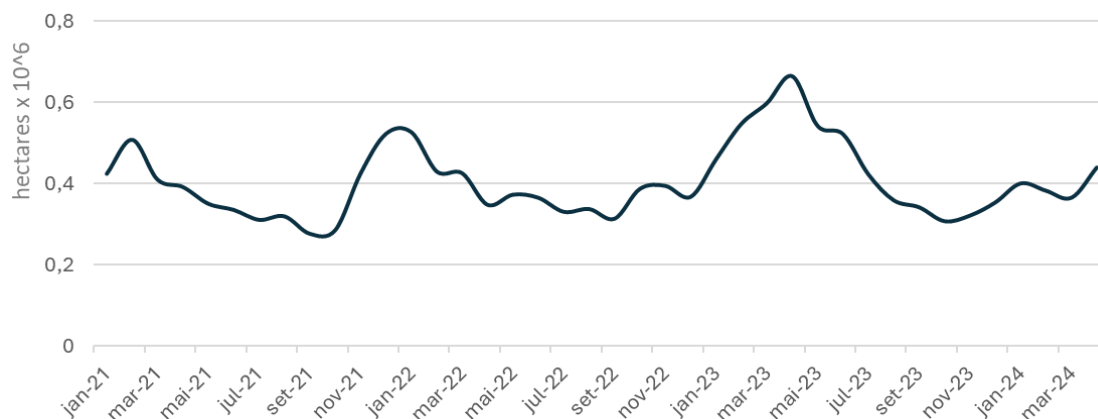


Figura 7 – Área mensal da superfície de água mapeada na Planície da Bacia do Alto Paraguai (BAP) com mosaicos mensais Planet/NICFI para o período de janeiro de 2021 a abril de 2024.

Apesar da limitação em mapear os campos alagados, o mapeamento derivado dos sensores Planet, mostra grande potencial como ferramenta para monitoramento e consequente geração de alertas sobre o fluxo de cheias e secas, representados pela superfície de água. A divulgação dos dados de mapeamento da superfície de água no Pantanal (Dias et al., 2024) gerou repercussão nacional e internacional ao alertar para indícios da seca extrema que o bioma enfrentaria em 2024. Outras evidências também reforçaram a situação de vulnerabilidade da planície pantaneira frente às alterações dos regimes inundações na BAP, como o nível de água do rio Paraguai em 2024, registrado pela Marinha em Ladário (Mato Grosso do Sul), o qual chegou ao seu nível mais baixo já medido desde 1900, atingindo a marca de 62 centímetros abaixo da cota de referência (Jeronymo, 2024). Isto ressalta o potencial do mapeamento e divulgação de produtos com resolução temporal mais detalhada para fornecer alertas precoces frente a situações extremas.

Mapeamento do Planalto

Em relação à área de Planalto é necessário ressaltar que o mapeamento mensal apresentou excesso de ruídos por comissão com áreas de solo exposto em áreas rurais. Sendo assim, considerando o padrão de corpos hídricos dessa região: rios perenes e encaixados, represas e açudes, o dado anual (com frequência mensal igual ou superior a seis meses) com mosaicos mensais de imagens Planet/NICFI foi considerada a melhor abordagem para mapear e analisar a superfície de água nessa região. A Figura 8 sintetiza a construção do dado anual para a região do Planalto, uma vez que a somatória do dado mensal, que considera frequências de 1 a 12, tende a incluir manchas de comissão da classificação, quando é realizado o filtro de frequência maior ou igual a seis (dado anual) grande parte dos ruídos são removidos devido a inconsistência temporal das áreas de comissão enquanto as feições de interesse são evidenciadas.

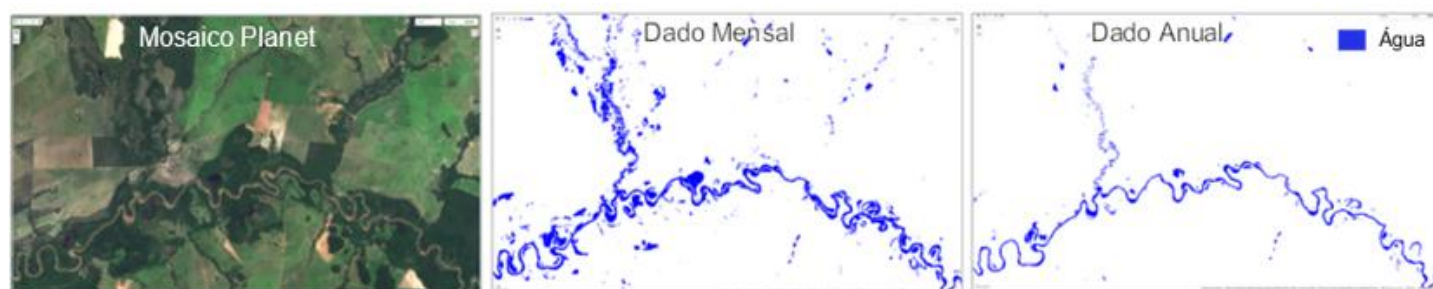


Figura 8 – Comparação da soma da classificação mensal e anual para a região de Planalto da Bacia do Alto Paraguai (BAP).

Foi observado um ganho de pelo menos 3 mil hectares de superfície de água mapeada quando comparado a outros mapeamentos anuais de referência feitos com Landsat e Sentinel 2 (ambos do projeto MapBiomas) para a mesma área (Figura 9).

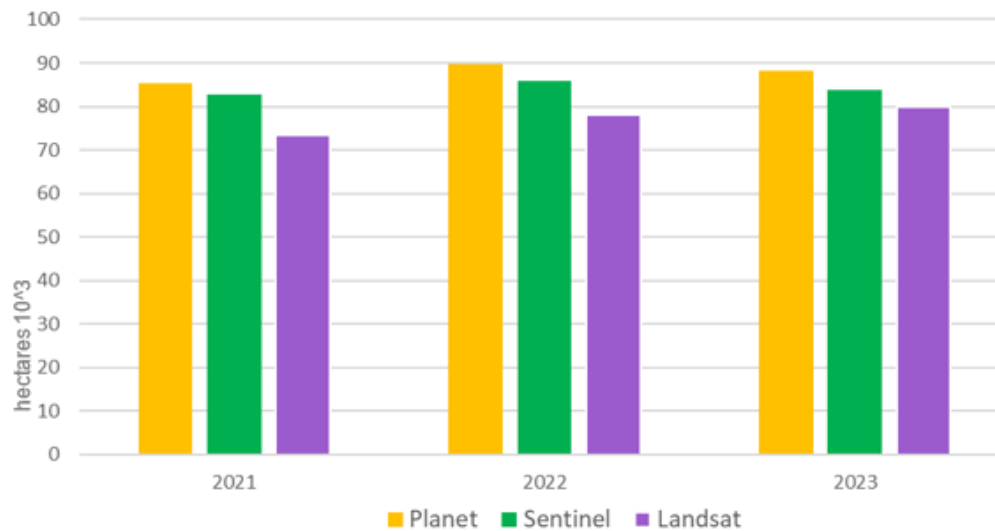


Figura 9 – Comparação da área de superfície de água anual mapeada no planalto da Bacia do Alto Paraguai (BAP) com produtos Planet, Sentinel e Landsat.

Os ganhos são principalmente na delimitação do leito dos rios e na delimitação de pequenas represas, lagos e bebedouros naturais em áreas de pastagem. Isso é explicado pela resolução espacial do dado Planet (5m) que possibilita a visualização e inclusão no mapeamento dessas novas áreas de superfície de água, ao mesmo tempo em que há uma menor generalização no contorno de rios e corpos hídricos. A Figura 10 apresenta um exemplo do ganho de informação, quando comparado com o produto Landsat, no mapeamento do rio Juba e no detalhamento da extensão de uma Pequena Central Hidrelétrica (PCH). Dessa forma, considerando a diferença de área mapeada, seria razoável dizer que, ao utilizar o dado Planet no Planalto, é possível mapear pelo menos 3,1% a mais em área do que as outras fontes, sendo esse valor como o resultado do balanço líquido entre o ganho de área pela inclusão de novas feições e a perda de área pela menor generalização dos *pixels* dessa resolução espacial.

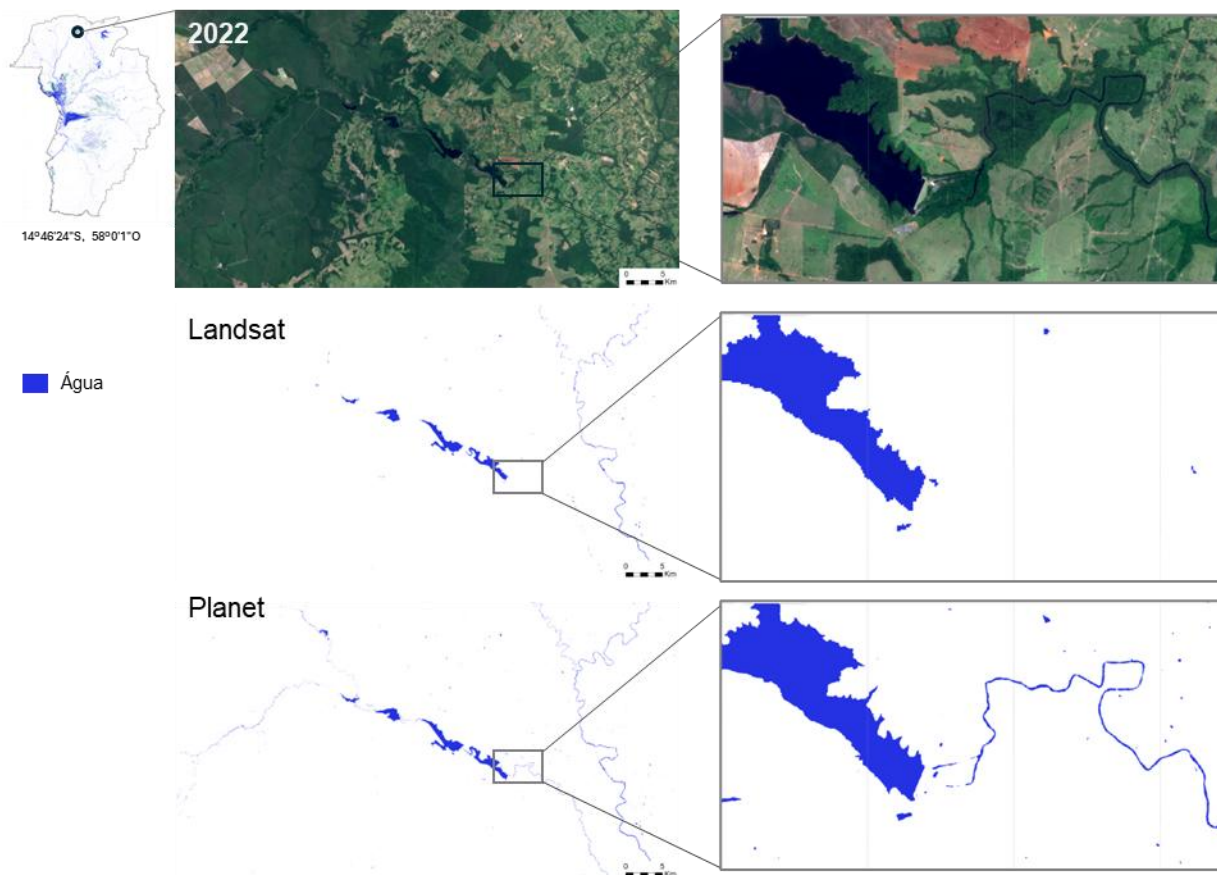


Figura 10 – Comparação da área das classes mapeadas com produtos Landsat (MapBiomass, 2023) e Planet para o Planalto da BAP ressaltando o mapeamento de novas feições e menor generalização da classe de superfície de água.

IV. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

O uso de imagens Planet confere ao mapeamento ganhos de pequenas massas d'água e monitoramento de dinâmicas hidrológicas rápidas, os dados provenientes dos satélites Landsat mantêm vantagens em análises multiespectrais de longo prazo. A combinação de ambos pode otimizar estudos de hidrologia em múltiplas escalas.

A disponibilidade gratuita das imagens dos satélites Planet e de ferramentas de alto desempenho, como o *Google Earth Engine*, representa um avanço significativo na democratização dos dados de sensoriamento remoto. Essas características possibilitam maior acessibilidade para a realização de análises e compreensão de processos ambientais dinâmicos. Dentre os principais desafios na utilização dos mosaicos mensais Planet/NICFI, pode-se listar a limitação da resolução espectral, que pode dificultar a diferenciação de alvos e a aplicação de índices espectrais. Além disso, a resolução radiométrica exige a remoção de ruídos da classificação, e há dificuldades em estabelecer consistência temporal nos dados em ambientes com grande diversidade de alvos. Esses fatores podem limitar a sua utilização em regiões muito extensas, pois exigem um trabalho manual

intensivo de validação e remoção de ruídos. Dessa forma, a abordagem local se destaca como a mais recomendada para a utilização desses dados, pois o esforço manual de inspeção e ajuste torna-se viável, além de facilitar a elaboração de um protocolo de validação do mapeamento.

O mapeamento da região do Planalto indicou grande potencial para a identificação de áreas de superfície de água, especialmente para a geração de um dado anual que destaca a ocorrência de feições de corpos hídricos. No entanto, não se mostrou promissor para uma abordagem de análise mensal do comportamento espaço-temporal dessa superfície de água. Foram identificadas novas áreas, principalmente pequenas superfícies de água, além de um melhor detalhamento de feições já mapeadas em outras fontes de dados. Já para a Planície da BAP, o mapeamento mensal da inundação se destacou em relação à identificação de áreas de superfície de água. No entanto, para a classe de 'campo alagado', não apresentou um bom desempenho em comparação com produtos já existentes baseados em Landsat.

Conclui-se que os mosaicos Planet/NICFI representam uma ferramenta valiosa para o monitoramento de alvos de pequena dimensão e eventos de alta sazonalidade, graças à sua resolução espacial e frequência mensal. Sua integração a plataformas de processamento em nuvem viabiliza análises em larga escala, embora apresente maior efetividade quando aplicada em contextos localizados. Essa sinergia entre dados abertos, ferramentas computacionais acessíveis e métodos de aprendizado de máquina pode contribuir para avanços na observação da Terra, oferecendo subsídios para o monitoramento contínuo da inundação e para apoiar ações de adaptação às mudanças climáticas.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao WWF - Brasil e WWF-Japão (PROJECT NUMBER: BR201400) pelo apoio financeiro ao estudo.

V. REFERÊNCIAS

- ALHO, C.; SABINO, J. Seasonal Pantanal flood pulse: implications for biodiversity. *Oecologia Australis*, v. 16, n. 4, p. 958-978, dez. 2012. DOI: <https://doi.org/10.4257/oeco.2012.1604.17>.
- ASSINE, M. L. et al. Geology and geomorphology of the Pantanal Basin. In: BERGIER, I.; ASSINE, M. L. (org.). *Dynamics of the Pantanal Wetland in South America*. Cham: Springer International Publishing, p. 23-50, 2015.
- BARBOSA, C. C. F.; NOVO, E. M. L. M.; MARTINS, V. S. *Introdução ao sensoriamento remoto de sistemas aquáticos: princípios e aplicações*. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2019. 161 p.
- BRASIL. Ministério do Interior. Superintendência do Desenvolvimento da Região Centro-Oeste – SUDECO. *Estudo de desenvolvimento integrado da Bacia do Alto Paraguai – EDIBAP: aproveitamento dos recursos naturais*. Brasília, DF: SUDECO, 1979. 239 p. il. (Volume 3).

BREIMAN, L. Random forests. Machine Learning, v. 45, n. 1, p. 5-32, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>.

CARVALHO JÚNIOR, O. A. Aplicações e perspectivas do sensoriamento remoto para o mapeamento de áreas inundáveis. Revista de Geografia, v. 35, n. 4, p. 412–431, 2018. DOI: <https://doi.org/10.51359/2238-6211.2018.238239>.

CHANDRASEKAR, K. et al. Land Surface Water Index (LSWI) response to rainfall and NDVI using the MODIS vegetation index product. International Journal of Remote Sensing, v. 31, n. 15, p. 3987-4005, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1080/01431160802575653>.

COOLEY, S. W. et al. Arctic-boreal lake dynamics revealed using CubeSat imagery. Geophysical Research Letters, v. 46, n. 4, p. 2111–2120, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1029/2018GL081584>.

CUNHA, C. N. et al. Classificação dos macrohabitats do Pantanal Brasileiro: atualização para políticas públicas e manejo de áreas protegidas. Biodiversidade Brasileira, v. 13, n. 1, p. 1-26, 2023. DOI: <https://doi.org/10.37002/biobrasil.v13i1.2223>.

DIAS, M. et al. Alerta precoce para mitigar impactos da seca no Pantanal. Nota técnica WWF, 2024. Disponível em: <https://wwfbrnew.awsassets.panda.org/downloads/0107-nota-tecnica---crise-hidrica.pdf>. Acesso em: 15 out. 2024.

EHRET, T. et al. Automatic monitoring of water level in small lakes using PlanetScope. In: IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium – IGARSS, 2021. IEEE, p. 3356-3359. DOI: <https://doi.org/10.1109/IGARSS47720.2021.9554431>.

FRAZIER, A. E.; HEMINGWAY, B. L. A technical review of Planet smallsat data: practical considerations for processing and using PlanetScope imagery. Remote Sensing, v. 13, n. 19, e3930, 2021.

GAO, B. C. Normalized Difference Water Index for remote sensing of vegetation liquid water from space. In: Imaging Spectrometry. SPIE, p. 225-236, 1995.

GOOGLE LLC. Google Earth. Versão 9.185.0.1, 2023. Disponível em: <https://www.google.com/earth/>. Acesso em: 10 out. 2023.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. CONASAT: Nano satélites. 2011. Disponível em: <http://www.crn.inpe.br/conasat1/nanosatt.php>. Acesso em: 20 mar. 2024.

JERONYMO, G. Rio Paraguai registra mínima histórica em ano mais seco no Pantanal. Agência Brasil, São Paulo, 13 out. 2024. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/meio-ambiente/noticia/2024-10/rio-paraguai-chega-minima-historica-em-ano-mais-seco-no-pantanal>. Acesso em: 14 out. 2024.

JUNK, W. et al. Biodiversity and its conservation in the Pantanal of Mato Grosso, Brazil. Aquatic Sciences, v. 68, n. 3, p. 278-309, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00027-006-0851-4>.

KARAMAN, M. High cadence monitoring of reservoir volume fluctuations using PlanetScope imagery. Journal of Hydrology, v. 606, e127456, 2022.

GORELICK, N. et al. Google Earth Engine: planetary-scale geospatial analysis for everyone. Remote Sensing of Environment, v. 202, p. 18–27, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>.

MANSARAY, A. et al. Comparing PlanetScope to Landsat-8 and Sentinel-2 for sensing water quality in reservoirs in agricultural watersheds. Remote Sensing, v. 13, e1847, 2021.

MAPBIOMAS PROJECT. Collection 8 of the annual land cover and land use maps of Brazil (1985–2022). MapBiomass Data, V1, 2023. DOI: <https://doi.org/10.58053/MapBiomass/V1J1CL>.

NICFI. Norway's International Climate and Forest Initiative (NICFI) Data. 2025. Disponível em: <https://www.nicfi.no>. Acesso em: mar. 2025.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA A EDUCAÇÃO, A CIÊNCIA E A CULTURA (UNESCO). Patrimônio mundial natural e reservas da biosfera no Brasil. Brasília, DF: UNESCO, 2000. Disponível em: <https://www.unesco.org/pt/fieldoffice/brasil/expertise/natural-heritage-biosphere-reserves>. Acesso em: 01 jul. 2023.

OLOFSSON, P. et al. Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change. Remote Sensing of Environment, v. 148, p. 42-57, 25 maio 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.015>.

PLANET LABS PBC. Planet basemaps product specifications. 2024. Disponível em: <https://assets.planet.com/products/basemap/planet-basemaps-product-specifications.pdf>. Acesso em: 20 mar. 2024.

POURSANIDIS, D. et al. CubeSats allow high spatiotemporal estimates of satellite-derived bathymetry. Remote Sensing, v. 11, n. 11, e1299, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs11111299>.

RESENDE, E. K. Pulso de inundação: processo ecológico essencial à vida no Pantanal. Corumbá: Embrapa Pantanal, 2008. (ISSN 1971-7223; 94).

OLIVEIRA, M. D.; CALHEIROS, D. F.; HAMILTON, S. K. Mass balances of major solutes, nutrients and particulate matter as water moves through the floodplains of the Pantanal (Paraguay River, Brazil). Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 24, e20170169, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/2318-0331.231820170169>.

RAMOS, M. D. et al. Avaliação do uso integrado de imagens de nanossatélites e classificadores baseados em aprendizado de máquina para estudos da dinâmica hidrológica na região da Nhecolândia (Pantanal). Revista Brasileira de Cartografia, v. 75, e67656, 2023. DOI: <https://doi.org/10.14393/rbcv75n0a-67656>.

ROQUE, F. O. et al. Upland habitat loss as a threat to Pantanal wetlands. Conservation Biology, v. 30, n. 5, p. 1131-1134, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1111/cobi.12713>.

SOUZA Jr., C. M. et al. Reconstructing three decades of land use and land cover changes in Brazilian biomes with Landsat archive and Earth Engine. Remote Sensing, v. 12, e2735, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12172735>.

STRICK, R. J. P. et al. Quantification of bedform dynamics and bedload sediment flux in sandy braided rivers from airborne and satellite imagery. Earth Surface Processes and Landforms, v. 44, n. 4, p. 953–972, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1002/esp.4558>.

VALMAN, J. S. et al. An AI approach to operationalise global daily PlanetScope satellite imagery for river water masking. Remote Sensing of Environment, v. 301, e113932, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113932>.

XU, H. A study on information extraction of water body with the modified normalized difference water index (MNDWI). Journal of Remote Sensing, v. 9, n. 5, 2005.