

ELABORAÇÃO DE ESTUDOS DE AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DA IMPLANTAÇÃO DE EMPREENDIMENTOS HIDRELÉTRICOS NA REGIÃO HIDROGRÁFICA DO PARAGUAI E PARA SUPORTE À ELABORAÇÃO DO PLANO DE RECURSOS HÍDRICOS DA RH-PARAGUAI

RELATÓRIO DE ATIVIDADES REFERENTES AO PRODUTO 10.2

1. INTRODUÇÃO

Este documento apresenta o relatório de atividades realizadas referentes ao produto 10.2, de **Quantificação das áreas inundáveis e análises dos padrões espaciais e temporais da dinâmica das inundações locais na Bacia do Alto Paraguai**. Estas atividades se inserem no escopo dos Estudos Hidrológicos e Sedimentológicos, que integram os estudos temáticos do modelo de Análise Multicritério, previstos no Termo de Referência e na proposta aprovada pela ANA. O objetivo desta temática é *“avaliar o impacto da operação de barragens sobre o regime hidrológico e o padrão espaço-temporal de inundações na região do Pantanal”*.

Nos relatórios de acompanhamento de atividade mensal produzidos anteriormente, foram apresentados os resultados do mapeamento das áreas de inundação sob influência dos rios Taquari, São Lourenço e Cuiabá, e suas áreas de conectividade lateral rio-planície, através de técnicas de sensoriamento remoto. Os mapeamentos realizados se basearam em um índice espectral proposto por McFeeters (1996) e modificado por Xu (2006), o MNDWI (Índice Modificado da Diferença de Água Normalizada), concebido para mapeamento automático da água presente em imagens de satélite. Com esta metodologia, pôde-se obter o recorte das águas cobertas por água superficial nas imagens de satélite registradas sobre os rios analisados neste estudo (Cuiabá, Paraguai, Piquiri-Correntes-Itiquira, São Lourenço e Taquari).

A separação das áreas de floresta, solo exposto e outros usos da classe de água em imagens orbitais não é um processamento trivial, visto que, principalmente relacionado ao mapeamento das áreas de água, a incidência de nuvens e a

confusão das áreas de água com as sombras destas nuvens é recorrente. Além disso, sabe-se que em nas áreas adjacentes aos rios (em sua planície de inundação), como no caso do Pantanal, pode existir expressiva cobertura de vegetação aquática de modo a cobrir toda a superfície aquática e mascarar a presença de água em alguns locais, visto que vegetação e água possuem respostas espectrais distintas.

A carga detrítica presente nos cursos d'água é composta por uma mistura de partículas de diversas espécies, tamanhos e formas, sendo transportada em solução, em suspensão ou no leito do rio. A carga em suspensão consiste de partículas sólidas, orgânicas e inorgânicas, sendo as últimas compostas por silte e argila (NOVO, 2008).

As técnicas de sensoriamento remoto da água baseiam-se na interação entre a radiação eletromagnética (REM) e os componentes opticamente ativos (COAs - Água, Fitoplankton, Material Colorido Dissolvido - CDOM e partículas em suspensão) presentes dentro do corpo d'água. O aumento da concentração de partículas em suspensão na água provoca uma mudança nas suas propriedades ópticas inerentes (IOPs) e aparentes (AOPs), tornando possível modelar matematicamente a relação entre as IOPs e AOPs, e, a partir dela, estimar a concentração de TSS e também avaliar sua origem.

Dados de sensores remotos, como o Operational Land Imager (OLI), a bordo do satélite Landsat 8, o MultiSpectral Instrument (MSI), a bordo dos satélites Sentinel 2A e 2B e o Wide Field Imager, a bordo do satélite CBERS-4, podem ser utilizados para esta modelagem, permitindo que se obtenham mapas de sedimentos em larga escala. Esta modelagem pode ser quantitativa (relacionada à quantificação da concentração total de sedimentos em suspensão) (MACIEL et al., [s.d.]; MONTANHER et al., 2014; NECHAD; RUDDICK; PARK, 2010) ou qualitativa, visando identificar classes de sedimentos através de técnicas de classificação e agrupamento de dados espectrais (LOBO et al., 2012).

Deste modo, buscou-se utilizar da modelagem de mistura espectral a fim de detectar a presença dos sedimentos orgânicos e inorgânicos nas imagens Landsat,

recortadas dentro do limite da área coberta por água gerada pelo MNDWI. Estes dados apresentam evidências de uma possível conexão de corpos d'água que não esteja visível nas imagens coletadas, dadas as suas limitações técnicas, considerando também a cobertura de nuvens e a periodicidade das imagens. Em outras palavras: ainda que na data da imagem coletada não seja possível observar visualmente a conexão entre quaisquer corpos d'água com o rio principal, é possível, através dos dados do modelo de mistura, identificar o rastro de sedimentos transportado pelo rio para estas áreas de conexão.

2. Possíveis impactos a serem causados pelas hidrelétricas e integração dos dados deste estudo com as demais áreas temáticas do Projeto

A matriz energética brasileira é predominantemente constituída pela geração hidrelétrica, com cerca de 63,08% (MME, 2018), por meio de usinas de pequeno a grande porte. Apesar de se caracterizar uma matriz energética limpa, os grandes barramentos das Usinas Hidrelétricas (UHEs) causam impactos socioambientais significativos, conforme destacado por diversos estudos realizados no Brasil (COELHO; CUNHA, 2014; RAMALHO, 2012; CAVALCANTI, 2011; ROCHA, 2010; CUNHA, 2001, 1992; COELHO, 2018, 2017) e também em outros países do mundo (GRAF, 2006; GORDON; MEENTEMEYER, 2006; PETTS; GURNELL, 2005; BRANDT, 2000; ROSENBERG et. al., 2000).

O crescimento de empreendimentos hidrelétricos de pequeno porte, como as Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs) tem aumentado no mundo todo, em parte por resultado do aumento do conhecimento e da aversão aos impactos negativos causados por grandes barragens. Internacionalmente, políticas públicas de incentivo à construção de pequenas hidrelétricas também tem contribuído para esta realidade, no intuito de promover o desenvolvimento de energias limpas e renováveis e evitar os grandes impactos causados por barragens maiores. No Brasil, uma legislação diferenciada e incentivos governamentais são fatores que contribuem para a instalação de várias hidrelétricas numa mesma bacia, inclusive no sistema de cascata em um mesmo rio (SILVA, 2015; KIBLER; TULLOS, 2013).

Entretanto, existem posições antagônicas em relação aos benefícios da implantação de PCHs ao invés de UHEs, visto que a implantação de duas ou mais PCHs em rios de uma mesma bacia ou em cascata no mesmo curso d'água podem causar impactos negativos tão grandes quanto ou maiores que uma UHE. Estudos que tratam da problemática dos impactos cumulativos de pequenas centrais hidrelétricas numa mesma bacia e/ou em cascata são poucos e recentes, entretanto, vêm ganhando cada vez mais repercussão, podendo citar Gallardo et. al. (2017), Silva (2015), Carvalho (2014), Cardoso et. al. (2015), Lopes (2013), Santos (2011) e Leão (2008).

A construção de barragens rompe a sequência natural de um rio em três áreas distintas: a montante da barragem, no reservatório e a jusante, causando alterações distintas nestes três compartimentos. A Tabela 1 apresenta um resumo das principais alterações elencadas por Cunha (1992) e organizadas por Coelho (2007).

Embora as PCHs não se utilizem de reservatórios volumosos e evitem seus impactos associados, surgem novos impactos associados à formação de um trecho de vazão reduzida (TVR), compreendido entre a barragem e a casa de força. A redução da vazão de um rio no trecho entre a barragem e o canal de fuga pode causar restrições do uso múltiplo da água, além de interrupção do fluxo migratório dos peixes (CARVALHO E FREITAS, 2017).

Silva (2015) analisou os impactos cumulativos de hidrelétricas sobre a hidrologia e a qualidade das águas do rio Jauru, também constituinte da Bacia do Alto Paraguai, no qual foram instalados 5 empreendimentos hidrelétricos em cascata, sendo 5 PCHs e 1 UHE. Os resultados identificaram alterações significativas em parâmetros importantes de qualidade da água, além da diminuição da vazão média do rio após a instalação das usinas, nas medições de uma estação fluviométrica a uma distância de 74,7 km a jusante da última usina.

Tabela 1. Alterações hidrológicas e geomorfológicas em setores de um rio represado		
Setor da bacia	Principais impactos hidrológicos	Principais impactos geomorfológicos
Montante da barragem	Deposição de carga sólida Mudança térmica das águas Redução da velocidade das águas Subida do nível das águas	Assoreamento na desembocadura dos rios principais Assoreamento no fundo dos vales principais Assoreamento na desembocadura e no fundo dos vales afluentes Formação de novas áreas de inundação
No reservatório e periferia	Armazenamento de carga líquida Armazenamento de carga sólida Modificação no conteúdo de gases dissolvidos Elevação do nível piezométrico (compressibilidade dos líquidos) Alteração nas taxas de infiltração Maior disponibilidade de água subterrânea Ocorrência de inundações Assoreamento no reservatório Redução da vida útil da barragem Alteração na transparência da água Alteração na estrutura térmica da água	Submersão das formas de relevo Processos de abrasão lacustre Recuo das margens ou das falésias lacustres Formação de praias e depósitos de abrasão Processos de assoreamento Formação de bancos arenosos emersos ou imersos Formação de lagoas fechadas Colmatação da desembocadura dos rios principais Formação de novas áreas de inundação
A jusante da barragem	Controle da regularização das descargas Redução da carga sólida (sedimentos)	Entalhe no leito do rio, com consequente descida do nível de base local Descida do nível de base dos afluentes com retomada erosiva

	Salinização da água	(entalhe) dos seus leitos
	Alteração na estrutura térmica	Processos de erosão nas margens
	Redução do nível piezométrico	Alteração nos sedimentos de fundo e das margens
	Alteração nas taxas de infiltração	Reajustamento na morfologia do canal pela migração dos setores de erosão e sedimentação
	Menor disponibilidade de água subterrânea	Processos de deposição nas margens e fundo do leito
		Modificações na dinâmica da foz

Fonte: Cunha (1992). Adaptado de Coelho (2007).

Carvalho (2014) analisou os possíveis efeitos multiplicadores da implantação de mais de uma PCH no mesmo trecho de um rio e discutiu as abordagens metodológicas e avaliações mais adequadas para analisar estes efeitos, observando situações em que as PCHs acumuladas causaram mais impactos negativos do que positivos.

Dois impactos em especial chamam a atenção para a implantação das usinas no planalto que circunda o Pantanal, são eles: a ruptura da conectividade longitudinal dos rios (da nascente à foz), constituindo-se como barreiras para os peixes, e a retenção de sedimentos, e conseqüentemente, de nutrientes das áreas do planalto para o Pantanal. Neste sentido, é necessário levar em consideração nos estudos de impactos da implantação de hidrelétricas, mesmo que as de pequeno porte, as características físicas da construção: seu tipo de funcionamento, tamanho do reservatório (se existente), do vertedouro, do barramento, entre outros aspectos. Tais características indicam a possibilidade de maior ou menor barramento dos sedimentos para a direção de jusante.

O produto aqui apresentado (Produto 10.2) trata das conexões laterais dos rios com suas planícies de inundação, que são um processo chave na biogeoquímica e manutenção dos habitats aquáticos fluviais, incluindo a abundância, diversidade, distribuição espacial, estrutura das comunidades e na dinâmica das populações de

peixes, sendo um tópico consagrado na literatura científica, como por exemplo o conceito de pulso de inundação. Nesse produto, foram mapeadas as conexões laterais rio-planície para demonstrar onde esses locais ocorrem sob influência de cada grande sub-bacia que drena para o Pantanal, bem como os locais de deposição de sedimento inorgânico dos rios Cuiabá, Paraguai, Piquiri/Itiquira/Correntes, São Lourenço e Taquari.

A determinação da carga de sedimentos suspensos na água é uma parte importante para o correto gerenciamento dos recursos hídricos em águas interiores. Dentre os diferentes parâmetros que podem ser analisados, a quantificação da concentração do total de sólidos em suspensão (TSS) é muito relevante porque seu aumento ou diminuição pode provocar diversos efeitos deletérios no corpo d'água; processos que podem alterar os corpos hídricos para eutrofização ou oligotrofismo e redução da biodiversidade com a consequente simplificação da cadeia alimentar aquática (BILOTTA; BRAZIER, 2008; CHAPMAN; HAYWARD; FAITHFUL, 2017; SPERLING, 1996). Os sedimentos em suspensão na água detectados pelas imagens de satélite, em especial os sedimentos inorgânicos funcionam como um traçador, mostrando até onde os rios influenciam na sua planície de inundação.

Utilizando essas técnicas de sensoriamento remoto a nível regional com os trabalhos de Padovani (2010) já se sabe, à priori, que as áreas inundáveis pelos rios são apenas uma parte da área inundável total do Pantanal, conforme apresentado no produto 6. Porém, são nessas áreas que ocorrem os processos biogeoquímicos e ecológicos rio-planície que influenciam em grande parte os peixes, a pesca e a socio-economia locais. São esses os locais que os ribeirinhos pescam e tiram o seu sustento, movimentando a socio-economia local.

Embora os resultados da análise dos impactos no regime hidrológico (alterações sub-diárias) apresentem-se bem baixos na região do Pantanal, tal fato não determina automaticamente que não vale a pena se apresentar outras abordagens e evidências para as alterações que podem ser causadas na planície. Há que se considerar os outros tipos de impactos associados à implantação das usinas, que podem causar desequilíbrios ambientais significativos no Pantanal, dada a

importância dos nutrientes transportados pelas águas dos rios nos sedimentos para a manutenção da biodiversidade local.

A integração destes dados com a modelagem hidrológica já realizada da propagação das ondas de alteração sub-diária pelas hidrelétricas, além dos resultados de produção potencial de sedimentos a partir de modelagem hidrossedimentológica, também já realizado e com os resultados da quantificação da retenção dos sedimentos pelas hidrelétricas, possibilitará um conjunto maior de evidências para a avaliação dos impactos. Além disso, também poderão ser integrados aos dados da pesca, quando da identificação das áreas onde ocorrem a atividade pesqueira e cruzá-las com os mapeamentos de áreas de conexão lateral dos rios.

3. Conceitos de geomorfologia fluvial

O conceito de leito fluvial corresponde ao espaço ocupado pelo escoamento das águas de um rio. Existem diferentes classificações de leito, cuja ocupação varia sazonalmente de acordo com os períodos de seca e de cheia dos rios, sendo eles: o leito de vazante, que está inserido dentro do leito menor, acompanhando a linha do talvegue; o leito menor, que corresponde à parte do canal ocupada pelas águas com uma frequência de escoamento que impeça o crescimento da vegetação, normalmente situado entre margues bem definidas (ou diques); e o leito maior e maior excepcional, que são as áreas ocupadas em períodos de cheia dos rios, sendo o último, em casos de eventos mais extremos, de menor frequência. As inundações causadas por um rio podem ocorrer a partir do aumento do nível das águas, em períodos de cheia, e consequente transbordamento das mesmas, ultrapassando o leito menor e passando a ocupar o leito maior do rio, como se observa na cor azul claro da Figura 1.

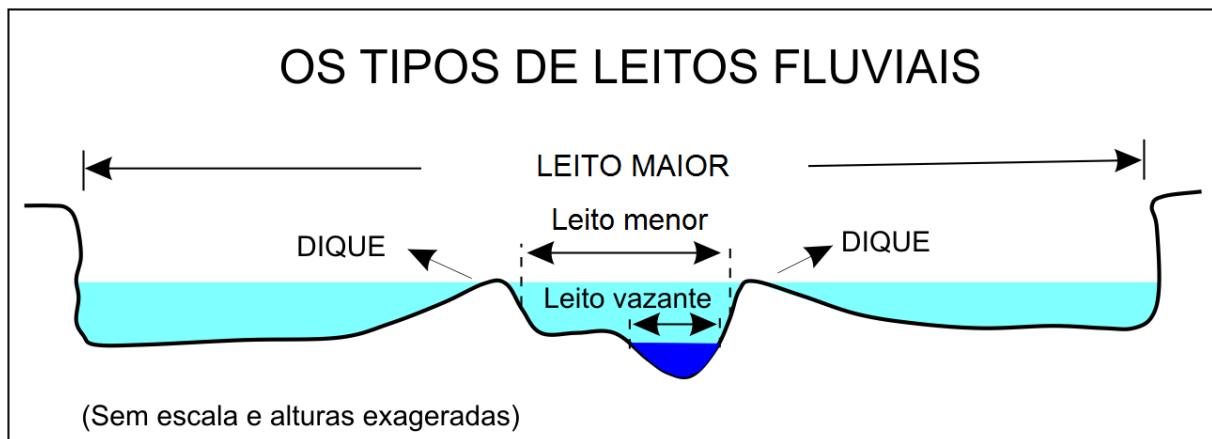


Figura 1 - Tipos de leitos fluviais, sendo o leito maior aquele ocupado em períodos de cheias excepcionais.

Fonte: Adaptado de Christofolletti (1980) e Bezerra (2010).

Outra maneira de ocorrerem inundações por rios ocorre a partir do rompimento de seus diques marginais e consequente extravasamento das águas do canal para as planícies adjacentes. Este rompimento pode causar fenômenos de avulsão fluvial, quando o rio passa a correr em uma nova direção única (para o local onde houve o rompimento), ou adquirir uma característica multicanal.

A Figura 2 apresenta um diagrama exemplificando os processos em que ocorre a avulsão, bastante comuns no Pantanal.

Para atingir o objetivo principal deste estudo, buscou-se compreender o funcionamento do Pantanal mato-grossense, com base em pesquisas já realizadas sobre o Pantanal por diversos autores. A seguir, serão apresentadas brevemente algumas características geoambientais do Pantanal, traçando um panorama geral no intuito de contextualizar os resultados alcançados.

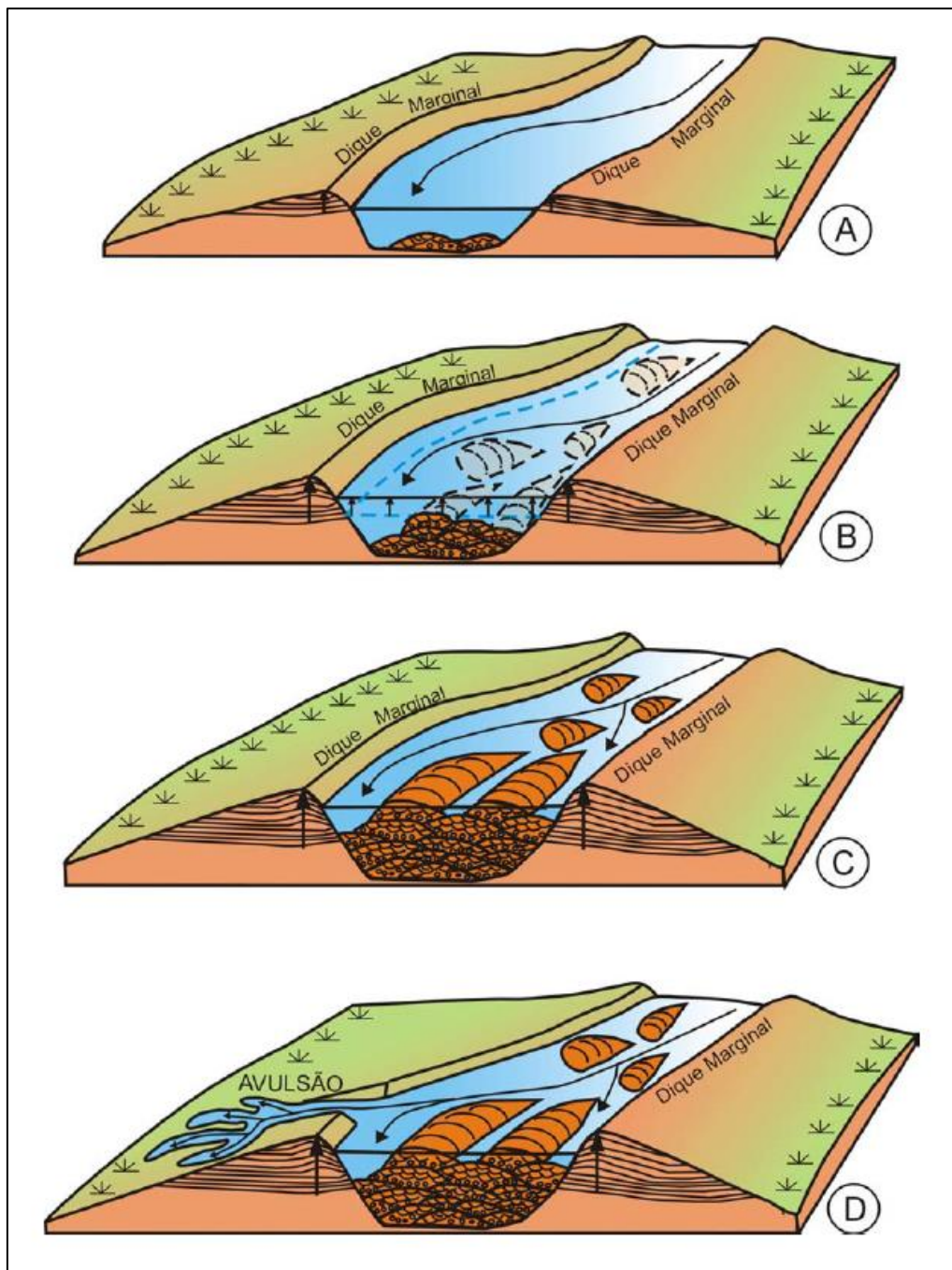


Figura 2 - Bloco diagrama sequencial de processos de avulsão fluvial. A) o canal vai ficando mais alto que as áreas adjacentes, limitado das mesmas por diques marginais que o rio constrói durante os transbordamentos em períodos de cheia; B) a deposição de sedimentos no canal forma dunas subaquosas e o leito se eleva por aggradação, assim como os diques marginais; C) com o assoreamento do canal, as barras ficam emersas mesmo nas cheias, diminuindo cada vez mais a capacidade do canal de reter água; D) durante uma cheia, o canal rompe o dique marginal, formando um leque de crevasse e causando inundações na planície adjacente, podendo resultar em mudanças

do curso do rio (avulsão), que passaria a correr em outra direção; ou bifurcações do leito, com rios multicanal. Fonte: Adaptado de Assine (2003).

4. CARACTERÍSTICAS GEOAMBIENTAIS DO PANTANAL

A bacia do alto Paraguai (BAP) ocupa cerca de 380.000 km² do território brasileiro, sendo que deste total, 138.000 km² correspondem ao Pantanal, e o restante às bacias de cada um de seus tributários, no planalto circundante. O tronco principal da bacia é o rio Paraguai, que flui de norte a sul, recebendo seus principais contribuintes pela margem esquerda. A drenagem do Pantanal se organiza em linhas subparalelas, constituídas por canais atuais, paleocanais episódicos ou abandonados, e por processos de construção de diques marginais. Nos períodos de cheias, os paleocanais funcionam como coletores de água, distribuindo as inundações ao receber água dos rios ou da precipitação local (ADAMOLI, 1995).

O regime de chuvas se concentra no verão, nos meses de dezembro, janeiro e fevereiro; e estação seca no inverno. Entretanto, devido ao baixo gradiente de declividade, o escoamento das águas é extremamente lento, e consequentemente, o pico de cheias alcança o exultório da bacia, no extremo sul do Pantanal, apenas no inverno, com um atraso de aproximadamente quatro meses (ADAMOLI, 1995; PADOVANI, 2010).

Do ponto de vista geomorfológico, o Pantanal mato-grossense é um amplo trato deposicional caracterizado por intensa sedimentação aluvial, no qual o rio Paraguai é o tronco principal. O rio Paraguai flui de norte a sul, atravessando domínios geomorfológicos distintos, e ao adentrar no Pantanal, há diminuição drástica no gradiente topográfico e o rio passa a ser um sítio de sedimentação e captação das águas dos diversos leques aluviais. A maior parte da superfície do Pantanal é composta por leques aluviais dominados por rios, sendo mais notável o do rio Taquari. No Pantanal atuam três grandes sistemas: sistemas de leques aluviais, sistemas de planícies fluviais e sistemas lacustres (ASSINE, 2003).

Nos sistemas de leques aluviais, não ocorrem migrações laterais dos canais principais dos rios, mas sim de mudanças bruscas no curso do rio. O suprimento de

sedimentos vindo da bacia de drenagem (no caso do Pantanal, das bacias do planalto) faz com que os canais dos rios sejam assoreados por aggradação. Durante as cheias, as águas carregadas de sedimento extravasam o canal, depositando sedimentos em suas margens com a diminuição da energia de transporte, formando diques marginais que crescem verticalmente. Com o tempo, o complexo canal/dique fica mais alto que as planícies adjacentes, e a tendência é que ocorram rompimentos dos diques marginais (localmente conhecidos como arrombados), com drenagem das águas e dos sedimentos para a planície de inundaçāo, ocorrendo avulsāo do canal principal. Fenômenos de avulsāo fluvial sāo comuns no Pantanal, principalmente nos rios Taquari e Sāo Lourenço, resultando em uma drenagem complexa nos sistemas distributários dos leques, com trechos de rios multicanaís e bifurcações. Ocorrem cinturões de meandramento confinados no ápice dos megaleques, onde os rios trabalham transportando água e materiais para as áreas mais baixas, diretamente para os lobos deposicionais atuais, enquanto que os lobos abandonados não recebem água direta dos rios principais.

Coexistem no Pantanal os sistemas de planícies fluviais, que ocorrem em trechos do rio Paraguai, Piquiri/Itiquira e Negro. Tais sistemas apresentam, a grosso modo, pequenos lagos, meandros abandonados e em construção e paleocanaís que se entrecortam, contando com áreas frequentemente alagadas. Os sistemas lacustres também ocorrem, em especial nas adjacências das planícies do rio Paraguai, recebendo a denominaçāo de lagoas.

O Pantanal apresenta uma grande variedade de ambientes, por conta de sua heterogeneidade edáfica e hidrológica. Em funçāo disso, pesquisadores propuseram diferentes delimitaões de sub-regiões ou de diferentes “Pantanais”, podendo citar as sub-regiões de Hamilton et. al. (1996), Silva e Abdon (1998) e Padovani (2010).

Nas pesquisas realizadas por este estudo, é possível observar as diferenças de ambientes dentro do Pantanal, sendo que cada rio desempenha diferente papel no aporte hídrico e sedimentar, podendo, entretanto, observar também semelhanças entre si. A seção de “Resultados” abordará as análises realizadas para as inundaões locais dos rios Taquari, Sāo Lourenço, Cuiabá, Paraguai e Piquiri-Itiquita-Correntes. A seguir, serāo apresentadas resumidamente as características

principais dos rios cujo resultado das análises será apresentado ao final, segundo informações coletadas em pesquisas já realizadas por outros autores.

4.1. Rio Taquari

O rio Taquari flui de leste para oeste, do planalto para a planície pantaneira, e desagua no rio Paraguai em sua margem esquerda. Na bacia do Alto Taquari, o rio drena a região do planalto, onde as altitudes chegam a mais de 800 metros. A transição entre o planalto e o Pantanal é brusca, marcada por uma linha de montanha no sentido norte-sul (Collischonn e Tucci, s/d). No Pantanal do Taquari, as altitudes variam de 190 metros no ápice (próximo à escarpa de transição planalto/planície) a 85 metros em sua base, na planície do rio Paraguai, a oeste, resultando num baixo gradiente de 36 cm/km. As baixas declividades resultam na diminuição da velocidade das águas do rio, ocorrendo predominância da deposição de sedimentos e a formação de um grande leque aluvial no curso inferior. A disposição das curvas de nível no megaleque do Taquari apresenta um perfil transversal convexo e longitudinal côncavo, feições características em sistemas de leques aluviais (ASSINE et. al, 2005; PADOVANI et. al., 2001).

A dinâmica sedimentar do megaleque é caracterizada pela construção e abandono de lobos deposicionais, deixando como testemunho uma complexa rede de paleocanais distributários. O rio Taquari corre hoje em dois compartimentos geomorfológicos distintos no Pantanal, tanto em termos de forma e dimensão como de processos de transporte e deposição de sedimentos, quais sejam: um cinturão de meandros na parte superior do leque, logo no início do Pantanal; e um lobo distributário atual em suas porções média e inferior (ASSINE, 2003). Ambos os compartimentos geomorfológicos identificados por Assine (op. cit.) são facilmente observáveis em imagens aéreas, como se observa na Figura 3.

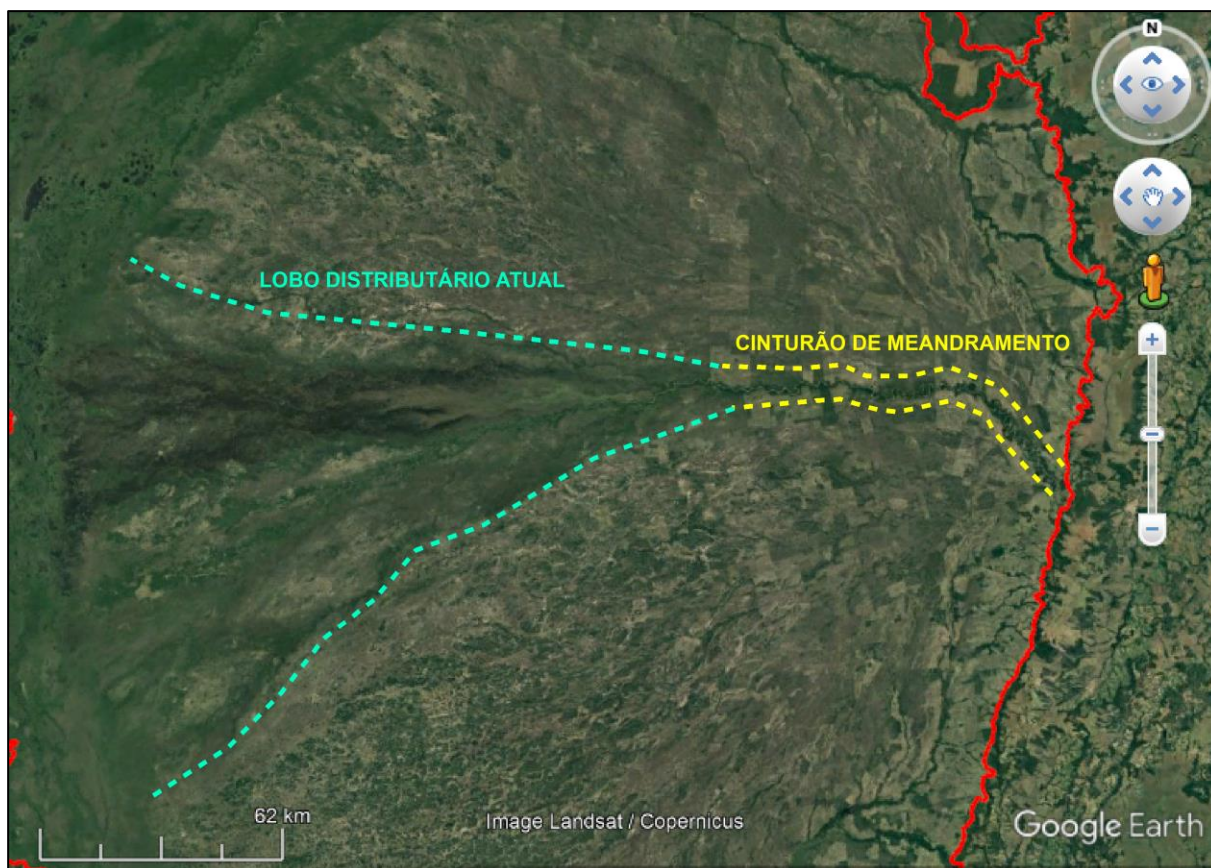


Figura 3. Compartimentos geomorfológicos do rio Taquari, no Pantanal, segundo Assine (2003). A linha de cor vermelha representa o limite do Pantanal, a linha pontilhada de cor amarela engloba a área do cinturão de meandros e a linha pontilhada verde, o lobo distributário atual. Fonte: imagem do Google Earth, delimitação de Assine (2003).

Zani et. al. (2006), a fim de compreender a evolução do sistema do megaleque do Taquari, mapearam e estabeleceram a cronologia dos lobos distributários, identificando um total de seis lobos, sendo um atual e cinco abandonados. Os lobos foram denominados em ordem numérica crescente de acordo com a cronologia interpretada, do mais atual para o mais antigo. A Figura 4 apresenta o mapeamento realizado, delimitando o megaleque e os lobos distributários na cor vermelha.

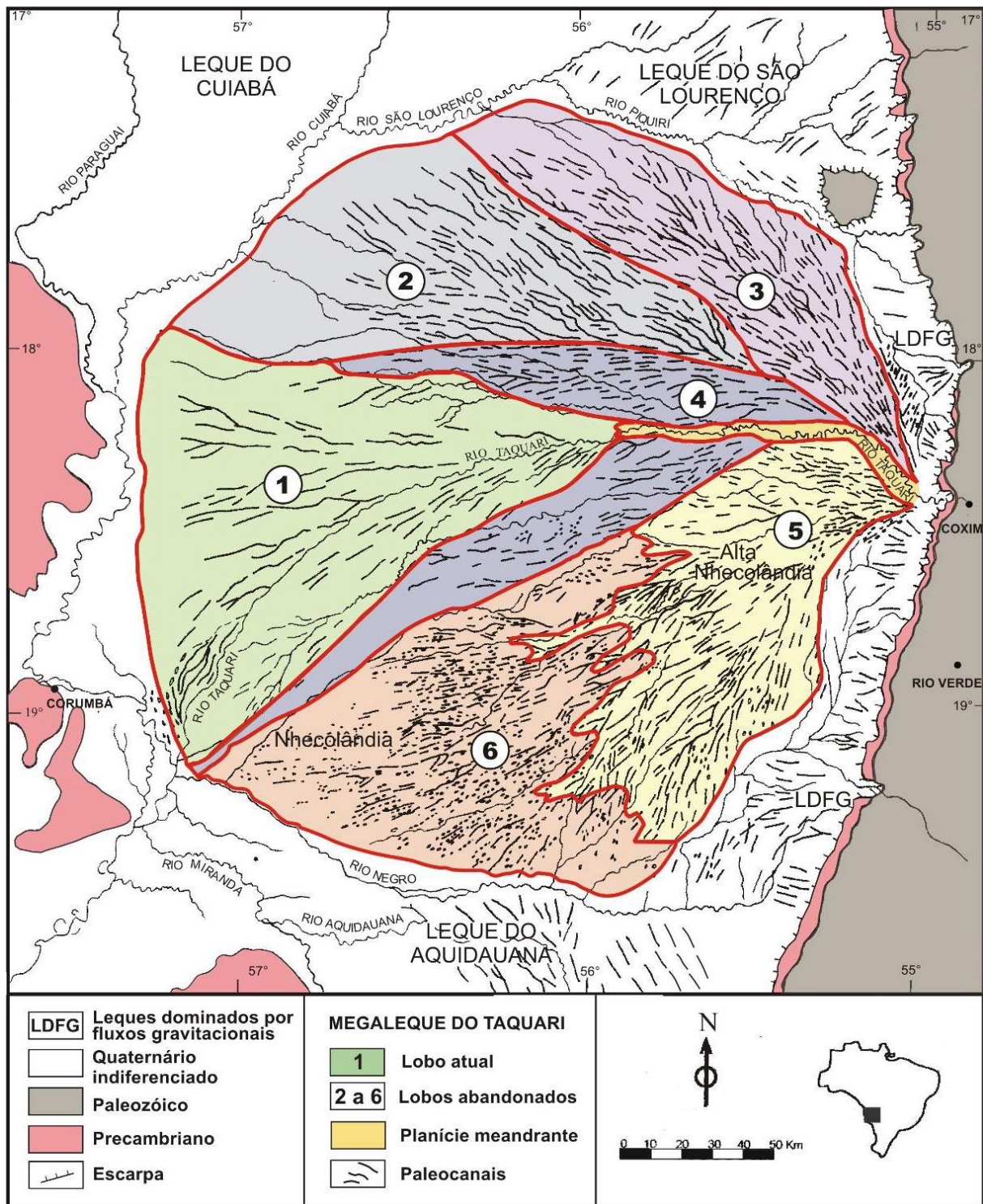


Figura 4. Lobos distributários do megaleque do Taquari. Fonte: Zani et. al. (2006).

Autores como Padovani, 2010; Assine, 2009, 2003; Zani et. al., 2006; Assine et. al., 2005, indicam que logo no início do Pantanal o rio Taquari encontra-se confinado no cinturão de meandros, entrincheirado sobre depósitos de lobos mais antigos e margeado por altos barrancos, não havendo neste trecho extravasamento das águas do rio pra a planície. Desta maneira, no primeiro trecho do rio dentro da planície

pantaneira, as inundações não são causadas pelas águas do rio, visto que inexiste, neste local, conectividade lateral entre rio e planície.

A pesquisa de Padovani (2010) indica que a partir da década de 1970 formou-se uma grande área permanentemente inundada por influencia do rio Taquari e também do rio Paraguai, à oeste, sendo a área correspondente ao lobo deposicional atual (Figura 4). Segundo os pecuaristas da região e pequenos produtores locais, essa região inundada não existia antes da década de 1970, sendo o aumento dos processos erosivos no planalto e consequente assoreamento do leito do rio Paraguai no pantanal, bem como o aumento das precipitações e da vazão dos rios a partir de 1970 os fatores apontados como principais causas para a inundação permanente desta área (PADOVANI, 2010).

4.2. Rio São Lourenço

O rio São Lourenço flui de leste para oeste, do planalto para a planície pantaneira, e deságua no rio Cuiabá em sua margem esquerda. A porção alta da bacia de drenagem do rio São Lourenço situa-se a leste nos planaltos dos Guimarães e do Taquari-Itiquira, com altitudes que decrescem de cerca de 800 m nos divisores de água para cerca de 200 m na saída para o Pantanal (Corradini e Assine, 2012). Assim como o rio Taquari, o rio São Lourenço também apresenta um megaleque, onde vem ocorrendo transformações contínuas na paisagem desde o pleistoceno.

Corradini (2011) realizou a delimitação e a compartimentação geomorfológica do megaleque do rio São Lourenço. Sua pesquisa evidenciou que se trata de um sistema deposicional alongado, com extensão aproximada de 200 km e largura de 120 km, sendo limitado ao sul pelo megaleque do rio Taquari, interpondo-se entre ambos a planície fluvial dos rios Piquiri e Itiquira. As altitudes têm suave caimento para oeste, de aproximadamente 200 m no ápice a 110 m na base do megaleque, situado na foz com o rio Cuiabá, resultando em gradiente de inclinação baixo, de cerca de 40 cm/km. Identificou três compartimentos geomorfológicos distintos, sendo: 1) lobos deposicionais abandonados, constituídos por depósitos aluviais pleistocênicos, em processo de dissecação e pedogênese; 2) cinturão de meandros, de idade holocênica, formado em vale inciso; e 3) lobos deposicionais ativos,

constituídos por depósitos holocênicos sobrepondo formas relictas de idade pleistocênica (Figura 5).

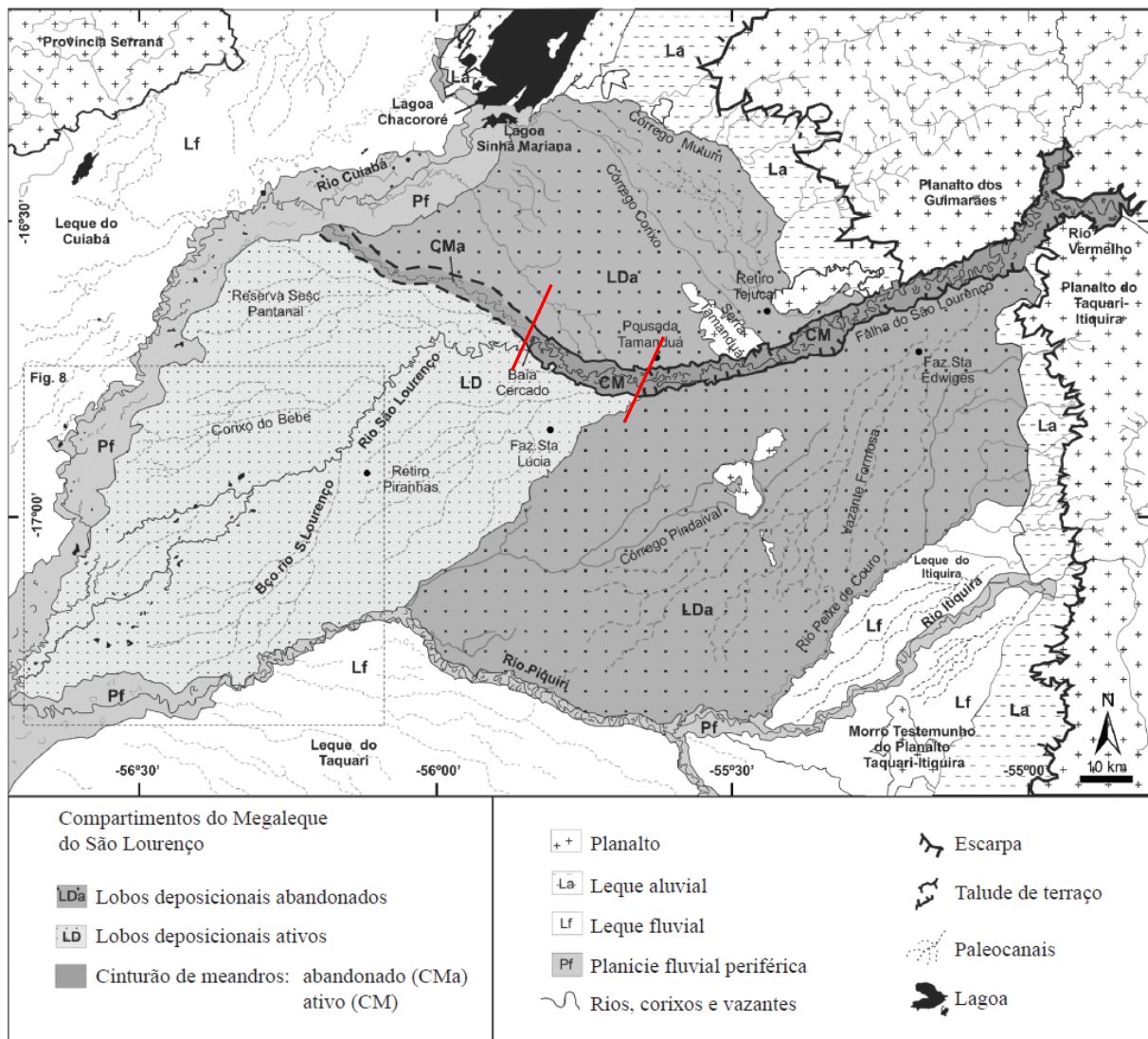


Figura 5. Compartimentação geomorfológica do megaleque do rio São Lourenço. Fonte: Corradini e Assine, 2012.

As pesquisas citadas acima (Corradini, 2011; Corradini e Assine, 2012) indicam que o rio São Lourenço, ao adentrar no Pantanal, encontra-se num cinturão de meandros que está confinado em um vale inciso. O cinturão apresenta variação em sua largura, atingindo sua maior expressão nas proximidades do Retiro Tejuca e na fazenda Santa Edwiges, com cerca de 8 km, e se reduz para menos de 3 km no trecho em que passa ao lado do morro testemunho conhecido como Serra do Tamanduá. O rio neste setor apresenta padrão meandrante, com barras em pontal, meandros abandonados (muitos formando lagos em ferradura) e espiras de

meandros. Esta área é caracterizada pela deposição ativa, sendo que o preenchimento sedimentar da planície é feito por agradação fluvial. A planície do São Lourenço encontra-se confinada por terraços marginais, não havendo, neste setor, transbordamento da água do canal para a planície aluvial durante as cheias. Padovani (2010) também identificou que a área ao sul do rio São Lourenço, sendo a mais antiga do megaleque e topograficamente mais alta, não recebe águas vindas do leito do rio, sendo a origem da inundação local provavelmente pelas precipitações locais.

Corradini e Assine (2012) identificaram a altura dos terraços que confinam a planície do rio, que ultrapassa os 5 metros no ápice do megaleque, decrescendo de montante para jusante. Mesmo com o desaparecimento dos terraços marginais, o cinturão de meandros continua ativo por mais 25 km, como pode se observar na Figura 5 a área indicada pelas linhas vermelhas. A partir de certo ponto, nas proximidades da fazenda Santa Lúcia e da pousada Tamanduá, as altitudes do cinturão de meandros e dos lobos deposicionais se tornam similares, e passam a ocorrer pontos de rompimento dos diques marginais e consequente perda significativa de água do leito do rio para as planícies adjacentes, em especial na margem esquerda (Corradini e Assine, 2012).

4.3. Rio Cuiabá

O rio Cuiabá flui predominantemente de norte a sul, do planalto para a planície pantaneira, recebendo água dos rios São Lourenço e Piquiri, pela margem esquerda, e desaguando no rio Paraguai também em sua margem esquerda.

Pupim (2014) delimitou e caracterizou o sistema deposicional do rio Cuiabá, classificando-o como megaleque. Em sua pesquisa, identificou que o sistema deposicional ocupa uma área de 15.300 km², cujo ápice se situa na borda norte do Pantanal, nas proximidades da cidade de Santo Antônio do Leverger (MT), e a porção distal se limita à planície do rio Paraguai, nas proximidades da Serra do Amolar (a oeste), e se limita aos megaleques do rio São Lourenço e Taquari a sudeste. As altitudes possuem gradiente suave, de 0,20 m/km, variando de 155 m de altitude no ápice e 90 m na porção distal. Identificou, ainda, que o rio Cuiabá sofre

mudança de estilo fluvial ao longo de seu percurso dentro do Pantanal, apresentando paleocanais com dimensões e morfologias distintas das exibidas no canal atual. Caracterizou três compartimentos geológico-geomorfológicos distintos, são eles: o paleoleque do Cuiabá, composto por paleocanais de padrão entrelaçado; planícies fluviais confinadas, com canais meandantes (atuais e paleo) e anabranching; e planície fluvial desconfinada, dominada por canais meandantes pré-atuais e atuais (Figura 6).

O resultado das pesquisas de Pupim (2014) indica que o rio Cuiabá, ao adentrar a planície do Pantanal, emerge de um vale estreito, encravado em um terreno quase plano da depressão cuiabana. A partir deste ponto, o rio Cuiabá flui por aproximadamente 100 km alojado em uma planície confinada entre sedimentos do paleoleque, à margem direita, e das planícies aluviais, dos relevos residuais, do sistema lacustre da baía Chacororé e do megaleque do São Lourenço, à margem esquerda, como se observa na Figura 6. O compartimento de planícies fluviais confinadas, com uma área de aproximadamente 1.632 km², é constantemente inundada pelo extravasamento do rio Cuiabá e por significativo aporte de água dos sistemas vizinhos. Destaca-se também o cinturão de meandros ativo, presente na porção superior do rio Cuiabá. O autor distingue a planície fluvial confinada do rio Cuiabá das planícies entrincheiradas dos megaleque do Taquari e do São Lourenço, primeiro por estar situada em região periférica do sistema, e não escavada na porção central; e segundo, pois o rio Cuiabá apresenta dois estilos fluviais contrastantes, correndo a princípio num trecho meandrante e passando para o estilo de canais múltiplos (anabranching), enquanto as planícies do Taquari e São Lourenço possuem apenas canais do tipo meandrante. Segundo o autor, a planície confinada do Cuiabá se assemelha à planície do alto curso do rio Paraguai.

O paleoleque do Cuiabá, localizado logo a sul/sudoeste das planícies fluviais confinadas (Figura 6), é topograficamente mais elevado que a planície do rio Cuiabá, e segundo o autor, não é inundado pelo extravasamento das águas do rio, mas sim por fluxos em lençol que coincidem com os períodos de maior precipitação. Na superfície do terreno, se destacam redes de paleocanais distributários, com bifurcações e consequente estreitamento para jusante. Segundo observado pelo autor, o leque antigo encontra-se em fase de degradação, causada pela erosão de

fluxo das águas pluviais, formando uma rede de canais atuais composta por cursos d'água de pequeno porte, sendo a maioria deles intermitente.

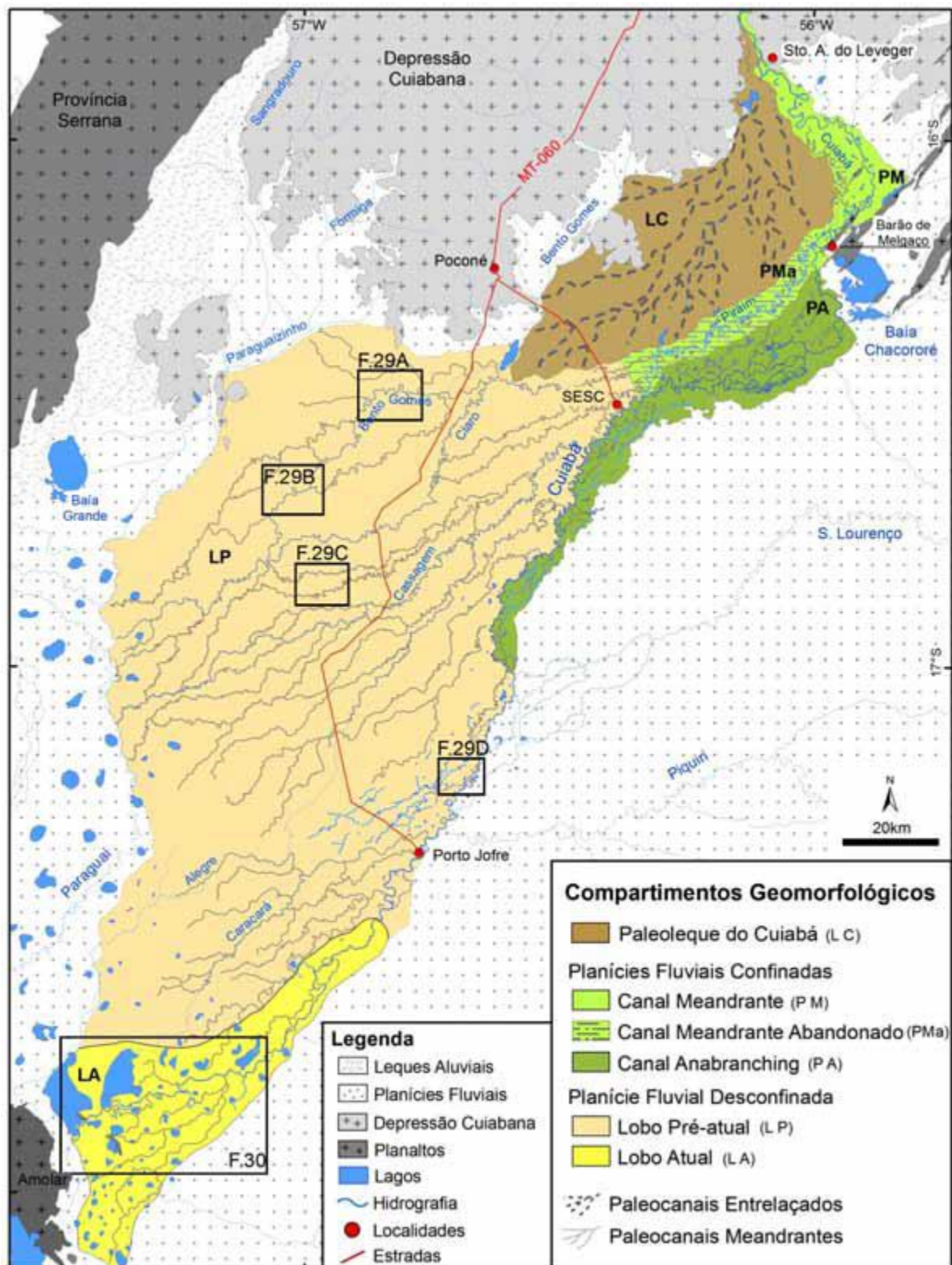


Figura 6. Compartimentação geomorfológica do megaleque do rio Cuiabá. Fonte: Pupim, 2014.

O compartimento de planície fluvial desconfiada é a maior feição do megaleque, com área de 11.790 km², ocupando as partes média e inferior do leque (Figura 6). O ápice deste compartimento se localiza na altura da confluência dos rios Piraim e Cuiabá. Nela, o rio Cuiabá perde água para a planície durante os períodos de cheia, com diminuição gradual nos níveis de vazão, na largura e sinuosidade de montante para jusante.

A Figura 7 apresenta os perfis topográficos gerados por Pupim (2014) com dados SRTM para o megaleque do rio Cuiabá, identificando o paleoleque do Cuiabá com altitudes maiores que a planície fluvial.

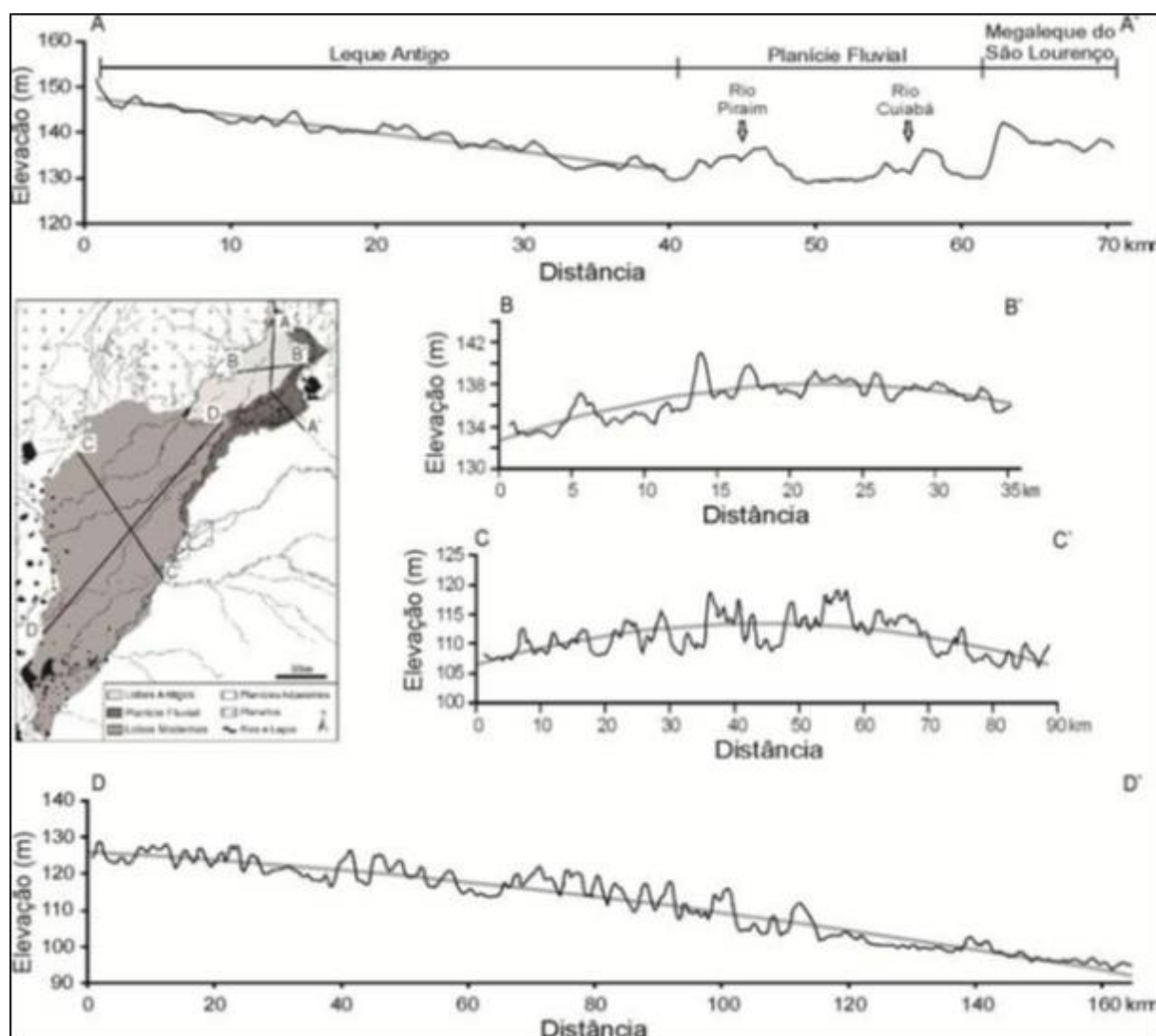


Figura 7. Perfis topográficos longitudinais e transversais. Fonte: Pupim (2014).

4.4. Rio Paraguai

O rio Paraguai é o principal tributário da Bacia do Alto Paraguai (BAP), nasce na região da Chapada dos Parecis, entre as serras de Tapirapuã e Tira Sentido, no estado do Mato Grosso. Caracteriza-se como um dos principais rios de planície do Brasil, percorrendo 2.6221 km de extensão no sentido norte-sul, sendo 1.693 km em território brasileiro. O rio Paraguai nasce em altitudes de 430 a 440 metros e alcança o Pantanal mato-grossense, onde as altitudes são menores que 200 metros (CALHEIROS; OLIVEIRA, 2010).

O rio Paraguai recebe água dos demais rios que drenam o Pantanal, com destaque para o Cuiabá, São Lourenço, Taquari e Miranda, pela margem esquerda, e os rios Sepotuba, Cabaçal e Jauru na margem direita, na região norte do Pantanal. Os rios da margem esquerda são mais longos que da margem direita, conferido à bacia uma forma assimétrica.

Silva (2010) delimitou a compartimentação geomorfológica do megaleque do Paraguai, identificando quatro compartimentos principais: 1) planície de meandros com canal meandrante; 2) planície de meandros com canal retilíneo; 3) lobo deposicional atual; 4) planície fluvio-lacustre, como se observa na Figura 8.

Os compartimentos geomorfológicos que compõem os cinturões de meandros em vale entrincheirado cortam os depósitos distais de antigos depósitos aluviais do leque do rio Jauru, a noroeste. Da foz do rio Jauru até próximo à Baía das Éguas, o rio Paraguai se encontra entrincheirado dentro de um vale com terraços marginais que decrescem em direção à jusante (SILVA, 2010), não havendo, nesta área, conexão lateral para além do limite do cinturão.

O rio Paraguai apresenta um padrão tipicamente meandrante, com presença de meandros abandonados, barras em pontal e lagos em meandros abandonados. Após a confluência do rio Jauru, o rio assume um padrão ligeiramente mais retilíneo, condicionado por uma falha de direção NNE, ainda entrincheirado. A partir da Baía das Éguas, o rio muda bruscamente de sentido para SE, onde os terraços marginais desaparecem e sua planície se desconfinava (SILVA, 2010).

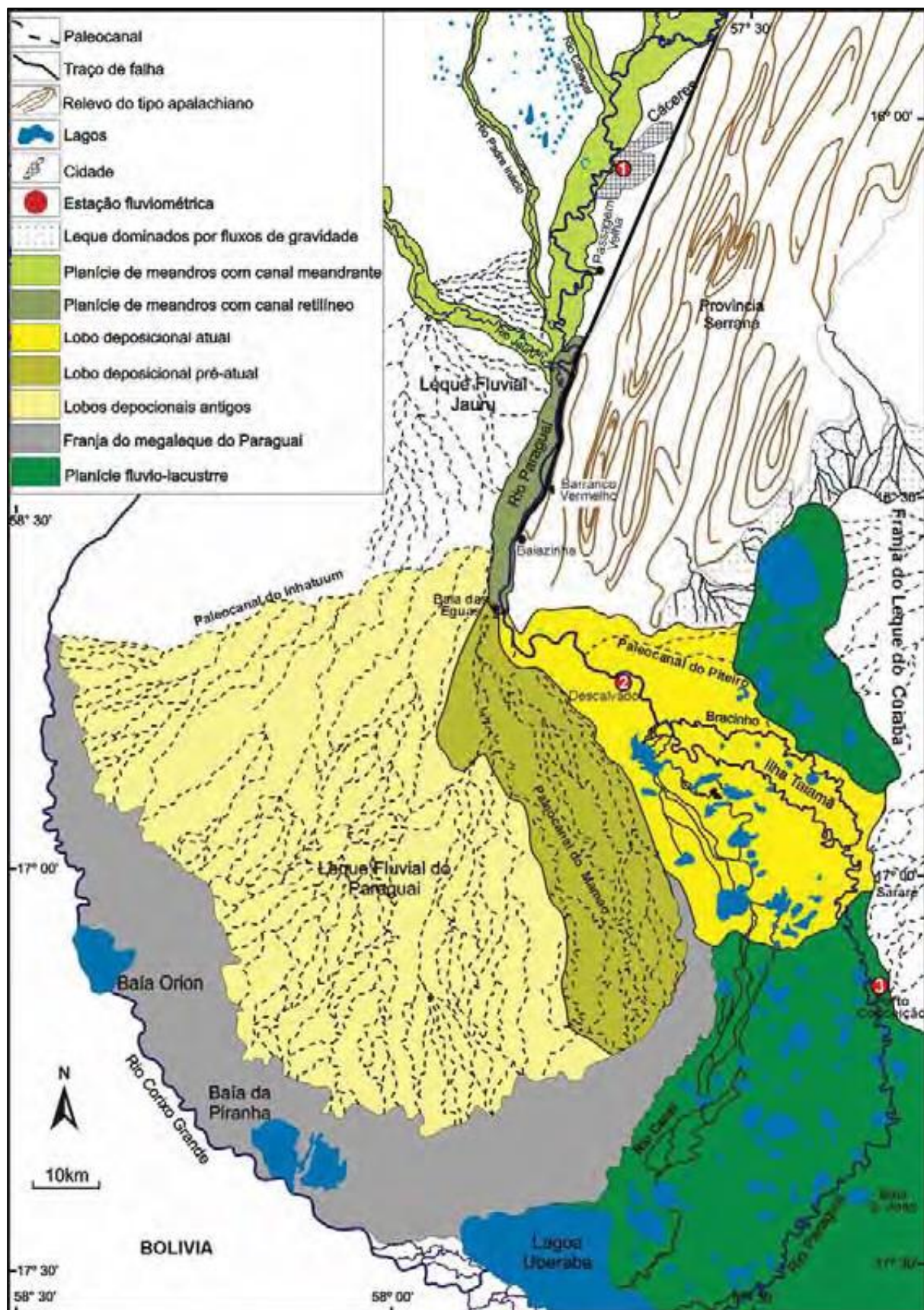


Figura 8. Compartimentação geomorfológica do megaleque do rio Paraguai. Fonte: Silva (2010).

Como se observa na Figura 8, no lobo deposicional atual, na altura da ilha de Taiamã, ocorre a bifurcação do canal principal do rio Paraguai e alguns processos de avulsão fluvial, setor onde o rio perde água para a planície tanto pelas avulsões quanto por processos de inundação. Esta região se caracteriza pela presença de lagoas sazonalmente inundáveis (SILVA, 2010).

É, portanto, a partir da área denominada de Baía das Éguas que o rio Paraguai começa a participar mais ativamente da inundação de grande parte da planície, com processos intensos de conexão lateral.

4.5. Rio Piquiri-Itiquira-Correntes

O rio Piquiri-Itiquira é formado pela confluência de três rios, na ordem de norte a sul: Itiquira, Correntes e Piquiri. Se localiza entre os rios São Lourenço, a norte, e Taquari, a sul, e deságua no rio Cuiabá, em sua margem esquerda.

Diferentemente dos demais sistemas analisados até o momento neste estudo, que formam megaleques fluviais, Pupim et. al. (2014) classificaram o sistema geomorfológico do Piquiri-Itiquira como um sistema de planícies interleques. O sistema conta com as compartimentações: paleoleque do Itiquira, planícies fluviais abandonadas e cinturões de meandro atuais, em uma faixa ligeiramente estreita limitada a norte pelo megaleque do São Lourenço, a sul pelo megaleque do Taquari, a oeste pelo megaleque do Cuiabá e a leste pelas escarpas do planalto Taquari-Itiquira.

Segundo os autores, a compartimentação de planícies fluviais abandonadas é formada em terrenos ligeiramente mais elevados que os cinturões de meandros e rebaixados em relação aos megaleques vizinhos (São Lourenço e Taquari). Observaram que as inundações nesta região, embora recebam água dos sistemas vizinhos, são de baixa magnitude e fortemente influenciadas pelas águas pluviais dos períodos mais chuvosos (dezembro a março). Os autores identificaram, ainda, que esta região encontra-se atualmente em estado de degradação, pela ação erosiva do escoamento das águas superficiais e pela alteração pedogenética (PUPIM ET. AL., 2014).

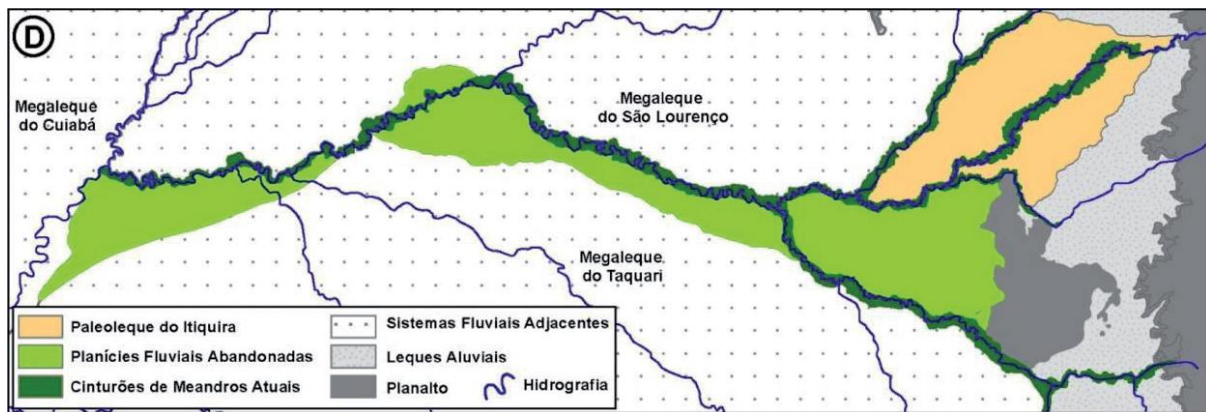


Figura 9. Compartimentação geomorfológica do sistema interleques do Piquiri-Itiquira. Fonte: Pupim et. al. (2014).

5. MATERIAIS E MÉTODOS

Partindo da hipótese de que a operação de empreendimentos hidrelétricos implantados no planalto poderia impactar a dinâmica local de inundações do Pantanal, buscaram-se ferramentas e metodologias que dessem conta de mapear e compreender a dinâmica das inundações locais no Pantanal, possibilitando inferir melhor a ocorrência de impactos na região. O objetivo principal foi avaliar onde e de que maneira existem conexões diretas da água do leito dos rios no Pantanal com as áreas alagadas em suas planícies adjacentes, identificando o local mais próximo onde ocorre conectividade lateral do rio com a planície, ao longo de seu perfil longitudinal (de montante à jusante). Tal informação é importante, visto que qualquer impacto causado no ambiente a partir de determinada intervenção antrópica possui uma propagação espacial que vai diminuindo quanto maior for a distância do local transformado (neste caso, do local onde será implantada a hidrelétrica).

O uso de tecnologias de geoprocessamento e produtos de sensoriamento remoto permitem uma abordagem sinóptica dos ambientes em áreas extensas e de difícil acesso, como é o caso do Pantanal. Ciente de que as inundações no Pantanal ocorrem durante os períodos de cheia dos rios, foram coletadas imagens de satélite que cobrissem o trecho inicial de entrada dos rios do planalto para o Pantanal, para identificar o primeiro local em que ocorre conectividade lateral entre o rio e a planície. A quantidade de cenas buscadas para cada rio variou em função do comprimento de cada um, e de suas características. As informações detalhadas das

cenas buscadas para cada rio estão descritas nos relatórios de atividades que foram produzidos mensalmente.

Para selecionar as imagens de satélite no período de cheia dos rios, primeiramente recorreu-se aos dados históricos de cotas (nível, em centímetro) no período de 1985 a 2018, sendo o ano de início em que existem imagens do satélite Landsat 5. Os dados diários de cotas dos rios foram organizados, a partir dos quais se calculou, a princípio, a curva de permanência de 5%, que é comumente utilizada em estudos hidrológicos e consiste em identificar, dentro de um conjunto de valores, a frequência com que um determinado valor é igualado ou superado. Ou seja: o período abarcado pela curva de 5% refere-se aos períodos de maiores cheias registradas no rio, dentro do período analisado (de 1985 a meados de junho de 2018). Entretanto, a quantidade de imagens obtidas no período da curva de permanência de 5% é pouco representativa, considerando que muitas imagens dentro deste período possuem cobertura expressiva de nuvens e se tornam inutilizáveis. Por este motivo, ampliou-se a busca para o período da curva de permanência de 10%, a fim de abranger uma amostragem mais significativa nos mapeamentos de inundação realizados. O detalhamento dos períodos de cheia e das imagens obtidas se encontra descrito nos relatórios de atividades que foram produzidos mensalmente.

5.1. Mapeamento das águas superficiais com o MNDWI

Para realizar o mapeamento das águas superficiais na planície optou-se por utilizar uma metodologia consagrada na literatura, desenvolvida por McFeeters (1996) e modificada por Xu (2006), chamada de Índice da Diferença Normalizada da Água Modificado (*Modified Normalized Difference Water Index* - MNDWI), que tem por objetivo realçar e delinear automaticamente as águas abertas através da operação de bandas multiespectrais. Com os resultados da aplicação desta metodologia para a análise do rio Taquari foi escrito um artigo, publicado nos anais do XIX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (GIL *et. al.*, 2019), reforçando a aplicabilidade e a qualidade da metodologia escolhida.

Este índice, que utiliza a diferença normalizada entre a faixa espectral do verde pela faixa do infravermelho de ondas curtas (SWIR, do inglês *shortwave infrared*), em que

a água, mesmo com altas concentrações de sedimentos, possui sinal negligenciável nesta faixa (XU, 2006). Xu (2006) propõe a utilização de um limiar > 0 para a separação da água para não-água. A princípio, foram utilizadas a banda verde e SIWR 1 dos satélites Landsat, como o limiar de 0. Entretanto, após testes realizados no mapeamento dos sedimentos em parceria com o INPE, observou-se um melhor resultado do mapeamento das feições aquáticas com a utilização da banda verde e SWIR 2, e adotando um limiar de 0,2.

A partir da imagem gerada pelo MNDWI, foi possível reclassificá-la e obter uma imagem apenas com os pixels de água (pixels $> 0,2$), posteriormente exportada para o formato vetorial de polígonos, a fim de analisar os corpos d'água e suas conexões com maior clareza. Para auxiliar na análise visual dos corpos d'água e demais feições presentes nas imagens, recorreu-se a utilização de composições coloridas na cor verdadeira (visualização da cena na cor natural, como o olho humano enxerga, possibilitando distinguir nuvens e sombras de nuvens, tarefa difícil de se realizar em imagens preto e branco) e falsa-cor (que possibilita identificar corpos d'água com presença de material em suspensão, como os rios, em cor azul; diferentemente de águas paradas que se apresentam na cor preta).

O mapeamento das feições aquáticas apresentou resultados positivos para a análise das conexões laterais dos rios com a planície, porém apresenta limitações. As áreas alagáveis do Pantanal possuem grande biodiversidade e expressiva cobertura de vegetações aquáticas, que por vezes cobrem toda a superfície aquática e podem mascarar a presença de canais de menor porte, comprometendo a identificação dos canais estreitos que realizam esta função de conectar as águas dos rios principais com a planície. Por este motivo, buscou-se realizar o mapeamento dos sedimentos em suspensão nos corpos d'água como um traçador da influência de água do rio nos demais corpos d'água na planície.

5.2. Modelo de mistura

Modelos de mistura espectrais quantificam qual a fração de cada pixel é de contribuição de determinado espectro de referência, podem ser utilizados para

mapeamento a avaliação da qualidade da água (NOVO et al., 2006), mapeamento de classes espectrais de contribuição (e.g. contribuição na refletância por material inorgânico, orgânico, algas) (RUDORFF; NOVO; GALVÃO, 2006) e também para mapeamento de inundações (FENG et al., 2015).

Os modelos de mistura são utilizados na tentativa de explicar os efeitos que a proporção de cada classe causa nas características espectrais de determinado pixel. O modelo de mistura espectral é um modelo físico em que um espectro é modelado através de uma combinação de espectros puros, chamados de *endmembers* (SHIMABUKURO; PONZONI, 2019). Quando os fótons interagem com um componente em determinado campo de visada (FOV), esta mistura pode ser modelada como a soma linear de cada componente com os pesos de cada proporção dos componentes em determinado FOV. Quando há múltiplos espalhamentos, como por exemplo na faixa do infravermelho próximo devido à alta refletância da vegetação, esta variação tem o potencial de não ser linear. Entretanto, na maioria dos casos esta não-linearidade pode ser negligenciada (ROBERTS *et al.*, 1998). Assim, o modelo de mistura linear é baseado na Equação 1:

$$P'_{i\lambda} = \sum_{k=1}^N f_{ki} * P_{k\lambda} + \varepsilon_{i\lambda} \quad (1)$$

Em que:

$$f_{ki} = 1$$

Onde a mistura espectral, $P'_{i\lambda}$ para uma localização i , é calculada a partir da soma dos N *endmembers* de referência, $P_{k\lambda}$, cada um com um peso dado pela fração f_{ki} . A parte não modelada desta equação é dada com o erro residual, $\varepsilon_{i\lambda}$.

Um exemplo da aplicação dos modelos de mistura é a separação da contribuição de um pixel de vegetação para as contribuições do solo, vegetação e sombra (SHIMABUKURO; PONZONI, 2018). São escolhidos pixels *endmembers*, ou seja, pixels que representam o comportamento mais puro possível de determinada classe. Assim, é possível, através de técnicas de modelagem matemática (veja mais em Shimabukuro e Ponzoni, 2018) obter imagens-fração para cada um dos *endmembers*. Estas imagens-fração irão representar a proporção dos componentes da mistura espectral. Em aplicações aquáticas, Ruddorf, Novo e Galvão (2006)

utilizaram imagens hiperespectrais do sensor Hyperion para separar em imagens-fração a contribuição de cada pixel por Clorofila-a (relacionado à floração de algas e à comunidade fitoplanctônica), Material Inorgânico em Suspensão (TSI) e carbono orgânico dissolvido (DOC) em águas do rio Amazonas e de alguns lagos de água clara (baixa concentração de TSS) em sua planície de inundação. Esta separação possibilitou observar com melhor entendimento a complexidade óptica inerente das águas Amazônicas. Já Feng et al. (2015), utilizou uma metodologia de mapeamento de áreas inundadas na China através da mistura espectral com múltiplos *endmembers* (MESMA, da sigla em inglês), obtendo uma acurácia de classificação de 94%. Já Novo et al. (2006), utilizaram a fração Chl-a de um modelo de mistura espectral para estimar a concentração de Chl-a nas planícies de inundação do baixo Amazonas, através de imagens do sensor MODIS. Outras aplicações como a estimativa de turbidez em lagos da planície do baixo Amazonas (ALCÂNTARA *et al.*, 2009) e estimativa de sedimentos em suspensão nos rios da Amazônia (MERTES; SMITH; ADAMS, 1993) também são relatadas na literatura.

5.3. MESMA

A utilização de modelos de mistura espectral por múltiplos *endmembers* (MESMA) possui uma vantagem em relação à modelagem pelo modelo linear de mistura espectral (LSMA). A LSMA assume que a reflectância em um determinado pixel é uma combinação linear dos distintos espectros de referência (i.e. *endmembers*) e os pesos representam a abundância dos *endmembers* em um pixel de referência (SHIMABUKURO; PONZONI, 2018).

Assim, o objetivo da LSMA é decompor o pixel em relação aos *endmembers* e, assim, obter uma imagem fração de cada mistura. Esta imagem fração pode ser estimada através de técnicas estatísticas, como mínimos quadrados e seu erro acessado através da métrica RMSE (Root Mean Squared Error). Outra técnica utilizada para decompor as imagens-fração, é o Multiple Endmember Spectral Mixture Analyses (MESMA). Diferentemente da LSMA, a MESMA utiliza vários *endmembers* para cada classe para descrever a variabilidade espectral de cada classe (ROBERTS et al., 1998). Estes *endmembers* podem ser obtidos através de

bibliotecas espectrais, de dados de reflectância in-situ ou de laboratório ou também através da própria imagem.

Após a seleção dos *endmembers*, as imagens fração são calculadas para cada um dos mesmos e também é calculado o RMSE. Foram selecionados três *endmembers* para explicar o comportamento óptico no Pantanal: O primeiro, com alta concentração de sedimentos, o segundo com média concentração de sedimentos e o terceiro, com alta concentração de material orgânico. Toda a metodologia será realizada no software estatístico R (R CORE TEAM, 2017), utilizando a função *mesma*, presente no pacote RSToolbox (LEUTNER; HORNING; SCHWALB-WILLMANN, 2018). Após a seleção dos *endmembers*, são calculadas as imagens fração para cada uma das classes de água.

5.4. Seleção dos *endmembers* - TSI e TSO

A seleção dos *endmembers* em aplicações aquáticas se baseia na mistura óptica existentes. Relacionados aos sedimentos, há duas classes opticamente ativas que podem ser abordadas pelo modelo de mistura espectral: Material inorgânico em suspensão (TSI) e material orgânico em suspensão / dissolvido (TSO e CDOM). Os desejados pixels puros, como necessitado para a geração dos *endmembers*, não pode ser conseguido em águas naturais devido à mistura de seus componentes opticamente ativos (COA) (ALCÂNTARA *et al.*, 2009). Eles, então, irão indicar a proporção relativa em que a concentração de cada COA irá estar relaciona aquele *endmember*. Alguns autores selecionam os *endmembers* baseados em bibliotecas espectrais ou simulações da reflectância da água (e.g. Hydroligth, WASI (GEGE, 2014)) (MERTES; SMITH; ADAMS, 1993). Esta metodologia de seleção dos pixels puros pode em alguns casos não considerar as características ópticas de determinado ambiente. Assim, é necessário a coleta de espectros diretamente da imagem (NOVO, E. M. L. DE M. *et al.*, 2006; NOVO, E. M.; SHIMABUKURO, 1994; RUDORFF; NOVO; GALVÃO, 2006). Este trabalho optou, devido à indisponibilidade de dados de laboratório ou *in-situ*, da utilização de *endmembers* derivados a partir das imagens. Os dois tipos de *endmembers* selecionados para este trabalho foram: TSI, que, com o aumento de sua concentração causa um aumento da reflectância

em todas as faixas espectrais (do visível e NIR) e o TSO/CDOM, que apresenta reflectância baixa em todas as faixas espectrais.

Estes *endmembers* foram selecionados nas imagens para cada um dos rios em separado. Esta separação entre os rios buscou eliminar efeitos de diferentes tipos de partículas, principalmente às relacionadas ao TSI, que influenciam a reflectância, como: origem do sedimento, variação do índice de refração relacionado ao tipo de sedimento e aspectos morfológicos dos diferentes rios (KOBAYASHI *et al.*, 2010). Para TSI, os *endmembers* foram amostrados no canal principal do rio observando, através de interpretação visual, locais com alta concentração de TSI (alto brilho nas faixas do visível e NIR) (Veja o exemplo na Figura 10). Já os *endmembers* para TSO foram adquiridos na região de inundação do pantanal, observado os critérios de baixa reflectância em todas as faixas espectrais e reflectância na faixa do NIR menor que a reflectância na faixa do vermelho. Diversos pixels nas áreas do pantanal, candidatos à *endmember* para TSO apresentaram maiores valores de reflectância no NIR que no vermelho, o que não é esperado para o comportamento deste tipo de sedimento (MACIEL *et al.*, 2019). Este efeito é devido à interferência por efeitos de adjacência das áreas de floresta e mata próximas às áreas de água e é uma fonte de erros na aplicação dos modelos de mistura neste ambiente (MARTINS *et al.*, 2017). A Figura 10 mostra pixels candidatos à *endmembers* de TSI e TSO: Veja o alto brilho no rio, relacionado à concentração de TSI e a alta absorção na lagoa, relacionado à alta carga de material orgânico.

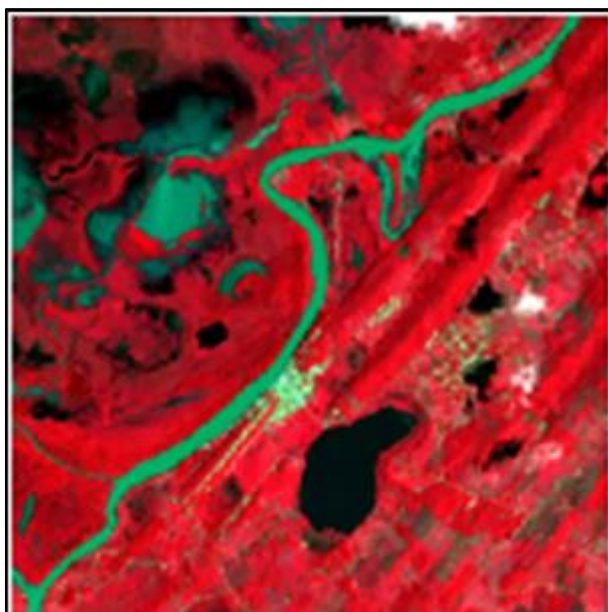


Figura 10. Exemplo de mostra pixels candidatos à *endmembers* de TSI e TSO.

Foram amostrados pontos em cada rio para pixels candidatos aos *endmembers* de TSI e TSO. Destes pontos, foram extraídos valores espúrios ou que não apresentavam o comportamento desejado para o critério de seleção dos *endmembers*. Assim, foi possível obter uma amostra para a construção dos *endmembers* das classes TSI e TSO em cada uma das cenas diferentes.

A partir destes pontos, foram extraídos os valores de reflectância para cada pixel em todas as imagens disponíveis, com baixa cobertura de nuvens nas imagens, para cada região. A Figura 11 apresenta os *endmembers* selecionados para TSI (em vermelho) e TSO (em preto). A partir de cada um destes *endmembers*, foi aplicado o modelo de mistura *mesma*.

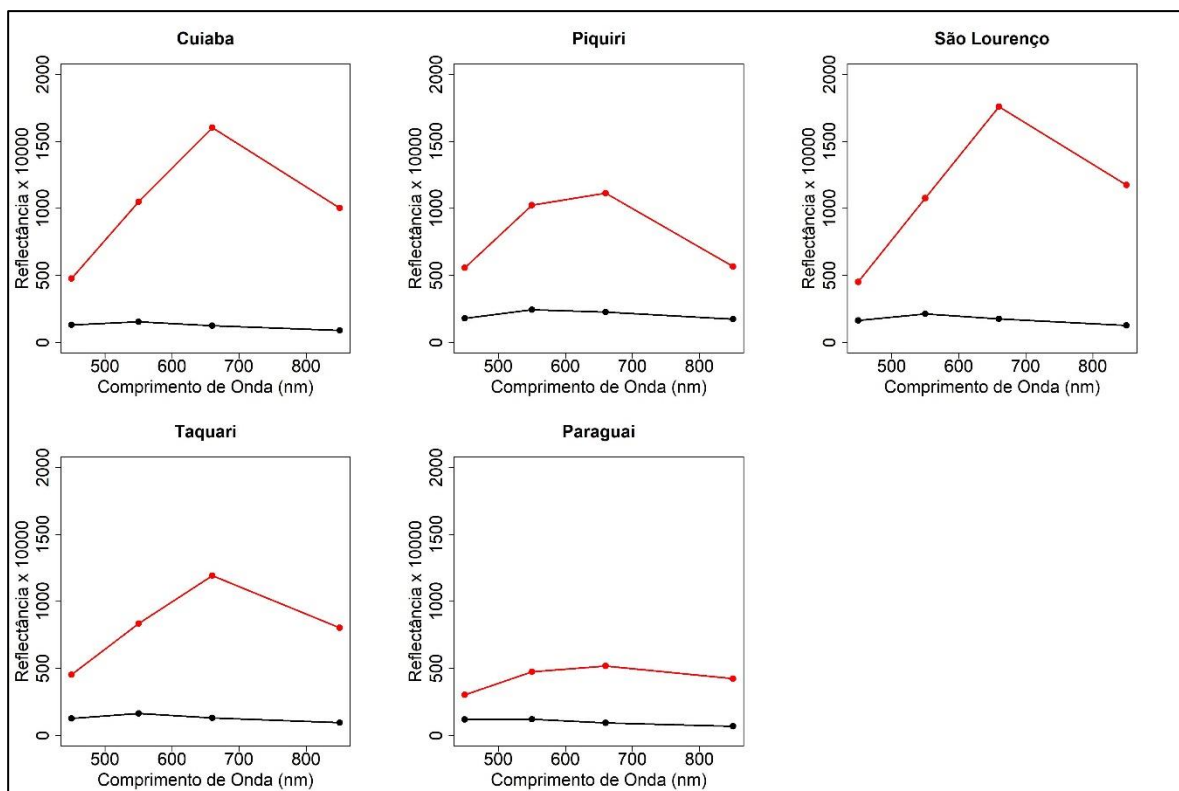


Figura 11. Endmembers selecionados para TSI (em vermelho) e TSO (em preto).

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1. Rio Taquari

O resultado dos mapeamentos gerados pelo MNDWI para as imagens da cena de montante corrobora as informações coletadas na literatura, apresentados no item 4.1. O índice utilizado demonstrou que, de fato, no primeiro trecho do rio dentro do Pantanal não existe conexão direta entre a água do rio Taquari e os paleocanais inundados. É possível ver a ocorrência de conectividade lateral dentro do cinturão de meandros, com a presença de meandros abandonados e pontos de extravasamento do rio que não se prolongam até a planície adjacente, para além do cinturão de meandros. Neste trecho inexistem corpos d'água com fluxo contínuo do leito do rio até a planície de inundação, como se observa na Figura 12, com o resultado do somatório de todos os mapeamentos do MNDWI para a cena de montante. A conversão do arquivo Raster do MNDWI contendo apenas os pixels de água para um formato vetorial de polígono, agrupa todos os corpos d'água contínuos em uma

mesma feição de polígono. Desta forma, foi possível selecionar a feição do leito do rio e verificar os corpos d'água que se conectam diretamente ao canal do rio.

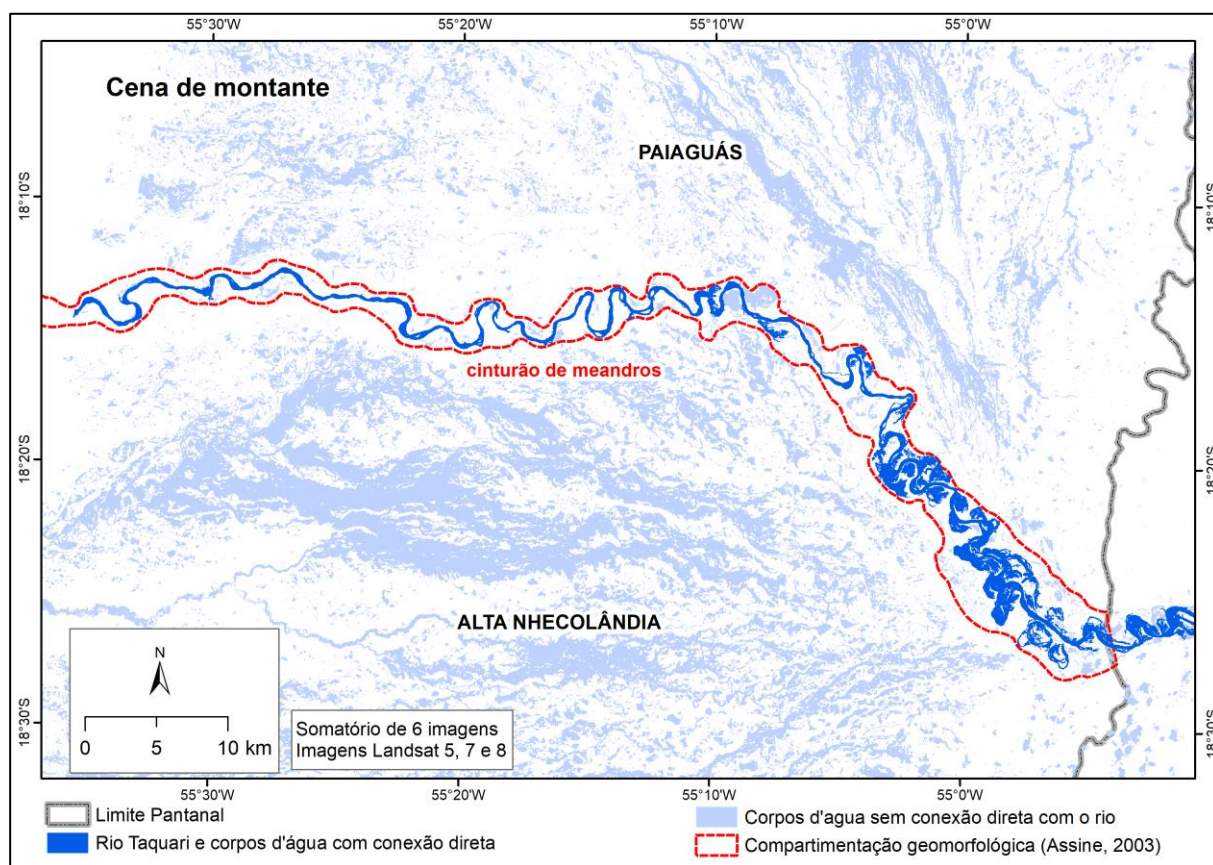


Figura 12. Resultado do MNDWI para a cena de montante do rio Taquari.

Nos produtos gerados pelo MNDWI ficam evidentes os padrões dos paleocanais no pantanal do Paiaguás, a norte do rio Taquari, no sentido noroeste (lobos distributários 2 e 3, conforme mapeamento de Zani et. al., 2006, Figura 4); e os paleocanais no sentido sudoeste na região de Alta Nhecolândia (lobo distributário 5, conforme mapeamento de Zani et. al., 2006).

Padovani (2010) observou que as regiões de Paiaguás e Nhecolândia Alta não recebem água do rio para suas inundações, embora apresentem grandes áreas com alta frequência de inundação. O autor frisa que não foi possível identificar a fonte de água para estas regiões, sendo provavelmente fruto da precipitação local e/ou movimento vertical das águas subterrâneas.

Os resultados do MNDWI para a cena de jusante também corroboram com as informações coletadas na literatura. O produto gerado demonstrou que o rio Taquari corre no padrão meandrante com o leito bem definido até o proximidade do arrombado Caronal. A partir deste ponto, as águas saem do canal, que diminui e se mistura com as demais áreas alagadas. A Figura 13 apresenta o resultado do MNDWI para as imagens coletadas de jusante. Os pontos de cor verde nas imagens indicam os arrombados do rio Taquari.

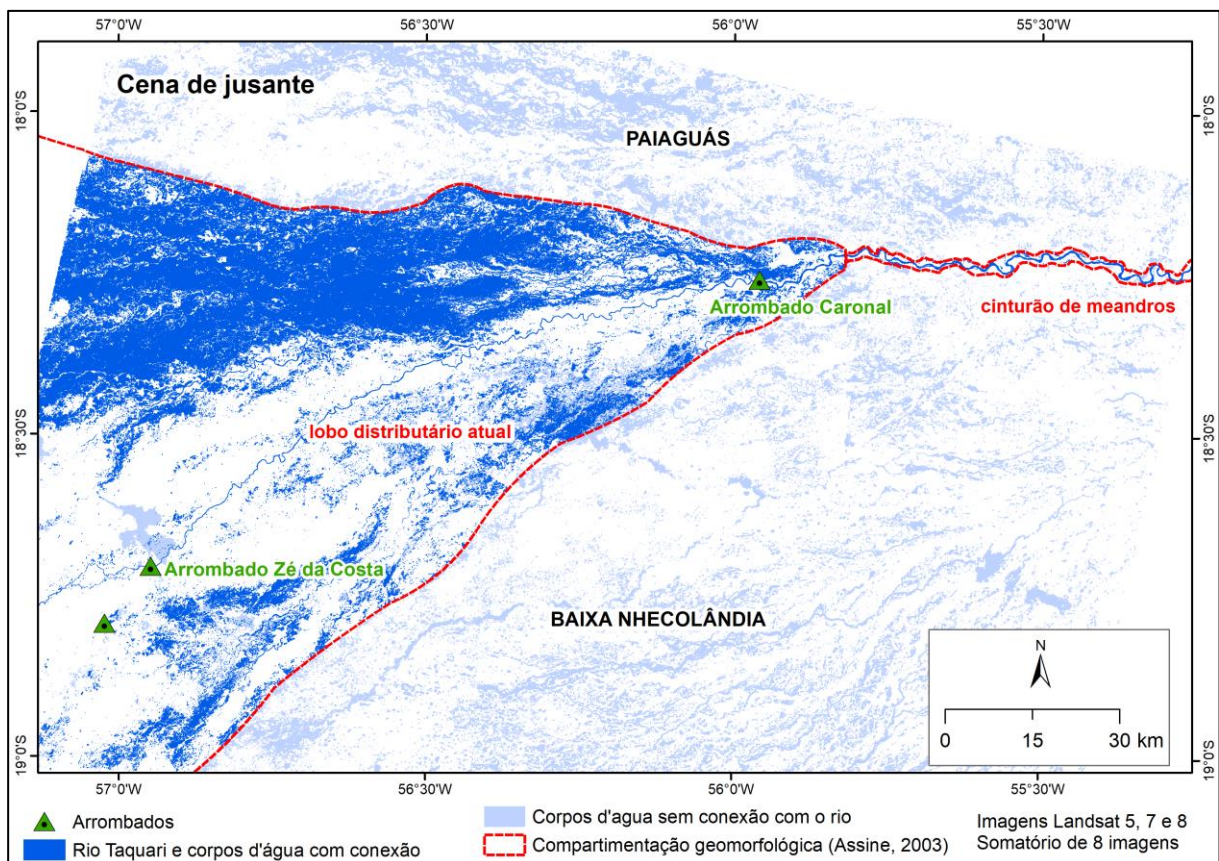


Figura 13. Resultado do MNDWI para a cena de jusante do rio Taquari.

A Figura 14 apresenta o MNDWI gerado para a cena de jusante em detalhe pra a região do arrombado Caronal, juntamente com a imagem em composição falsa-cor para 04 de fevereiro de 2018. É possível observar o padrão distributário que o rio Taquari assume a partir do arrombado Caronal, bifurcando-se em multicanais. Deste ponto em direção a jusante, ocorre espriamento expressivo das águas do rio Taquari para a planície, ocupando grandes áreas que apresentam inundação permanente, conforme identificado por Padovani (2010).

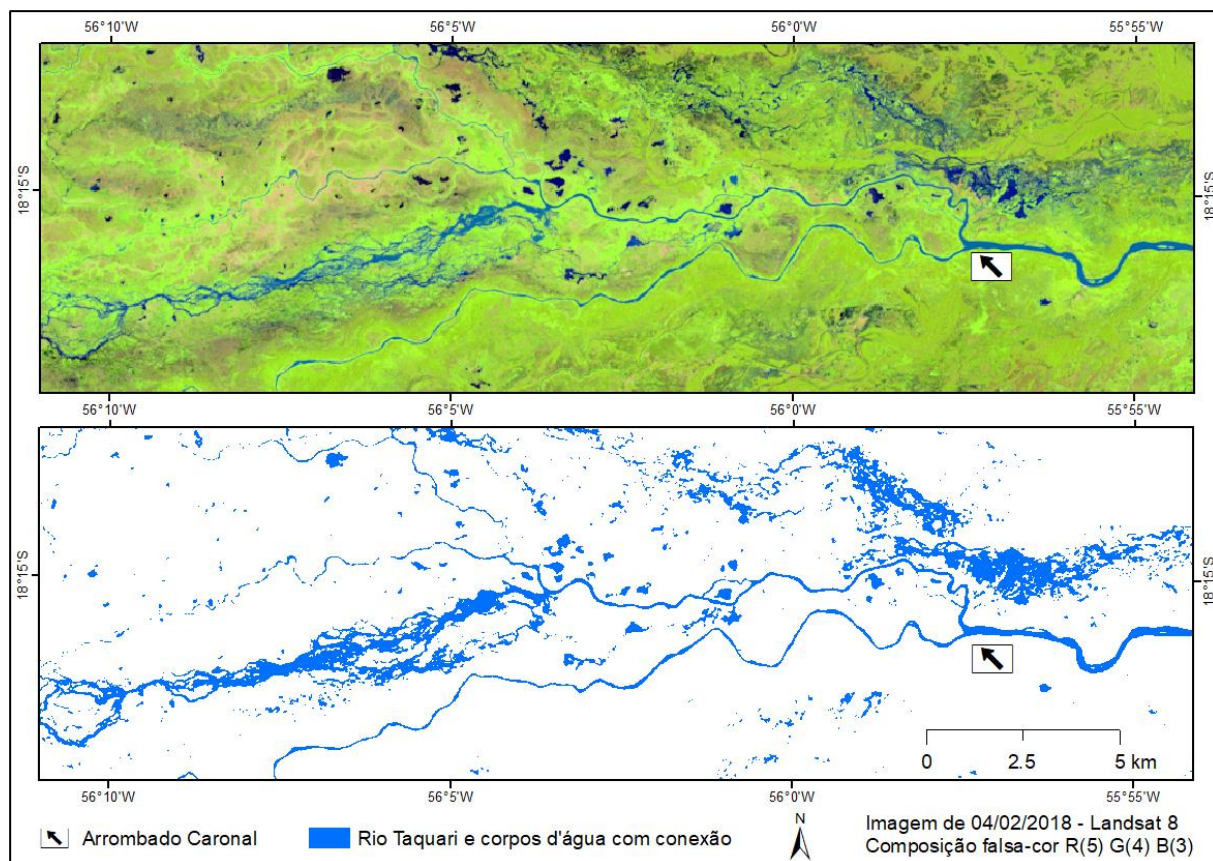


Figura 14. Detalhe do arrombado Caronal e extravasamento das águas do rio Taquari pra a planície.

Conforme observado pelos resultados desta pesquisa e pela literatura consultada, o cinturão de meandros limita o local até onde ocorre a conexão lateral do rio com a planície de inundação, no início do megaléque. O rio começa a extravasar para a planície apenas a partir das proximidades do arrombado Caronal, onde foi delimitado o lobo distributário atual. Desta forma, pode-se considerar que a área onde ocorre conectividade lateral do rio Taquari com a planície, coincide com a compartimentação geomorfológica proposta por Assine (2003), dentro do cinturão de meandramentos e do lobo distributário atual.

Foram analisados os dados de variação sub-diária das vazões a jusante das hidrelétricas, elaborado por Walter Collischonn do IPH. Os dados estão elencados numa escala de 0 a 1, sendo 0 o menor impacto de variação sub-diária da vazão e 1 o impacto máximo de variação sub-diária da vazão. Estes valores foram convertidos em percentual para melhor compreensão, sendo 1 equivalente a 100% dos impactos. No caso do rio Taquari, no primeiro contato do rio com a borda do

Pantanal, o impacto equivale a 9,1%, decaindo em direção a jusante. No local onde ocorrem os primeiros pontos de extravasamento do rio e conectividade lateral com a planície, localizado a aproximadamente 175 km após a borda do Pantanal, os impactos calculados totalizam 3,8%, e seguem decaindo em direção a jusante até atingir o valor de 1,5% na porção mais distal do megaléque, conforme se observa na Figura 15.

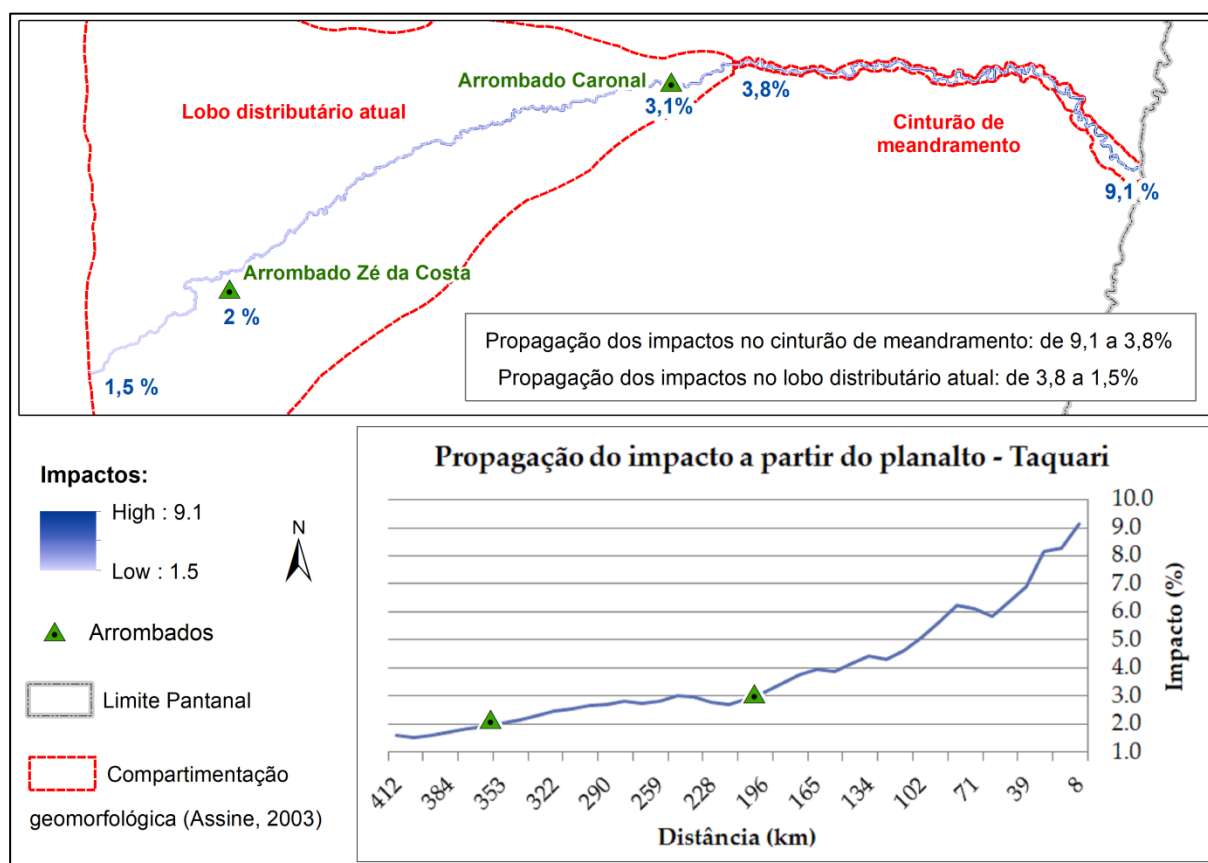


Figura 15. Propagação do impacto de variação sub-diária das vazões a partir do planalto - rio Taquari.

O modelo de mistura para a fração TSI (sedimentos inorgânicos) demonstra comportamento similar ao identificado pelas análises anteriores, reforçando o fato de que no trecho inicial do rio Taquari no Pantanal, onde se encontra delimitado pelo cinturão de meandramentos, existe diferença na composição sedimentar do leito do rio e das demais águas na planície.

A Figura 16 apresenta o modelo de mistura gerado para 4 datas distintas da cena de montante, cuja coloração vermelha aponta maior contribuição de pixels de

sedimento inorgânico (TSI), decaindo para valores mais baixos nas cores laranja e amarelo. É possível observar grande concentração de TSI no leito do rio, que diminui para as águas da planície.

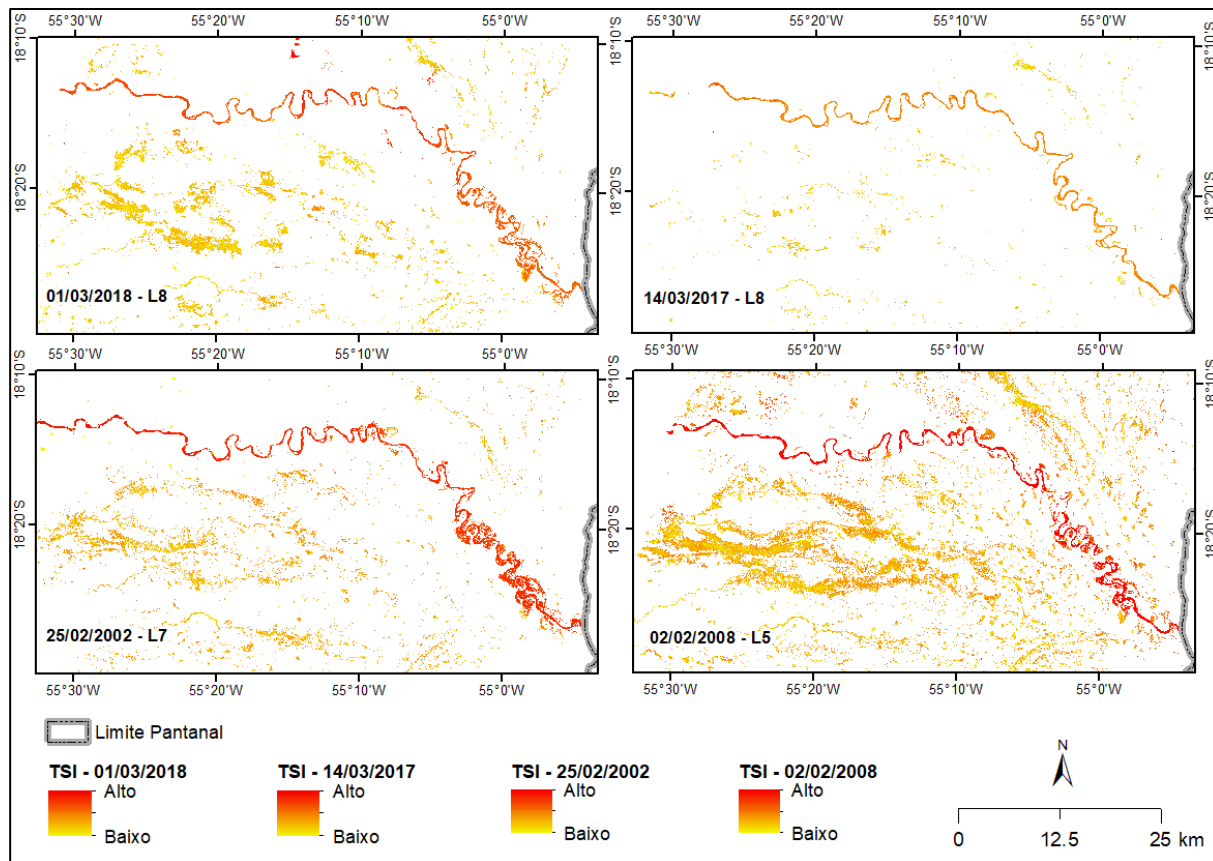


Figura 16. Fração TSI para a cena de montante do rio Taquari.

Para a cena de jusante, é possível observar nas Figuras 17 e 18, a partir do arrombado Caronal, a presença de pixels com concentração elevada de TSI nas áreas inundadas da planície, reforçando a contribuição do rio Taquari para as inundações neste setor.

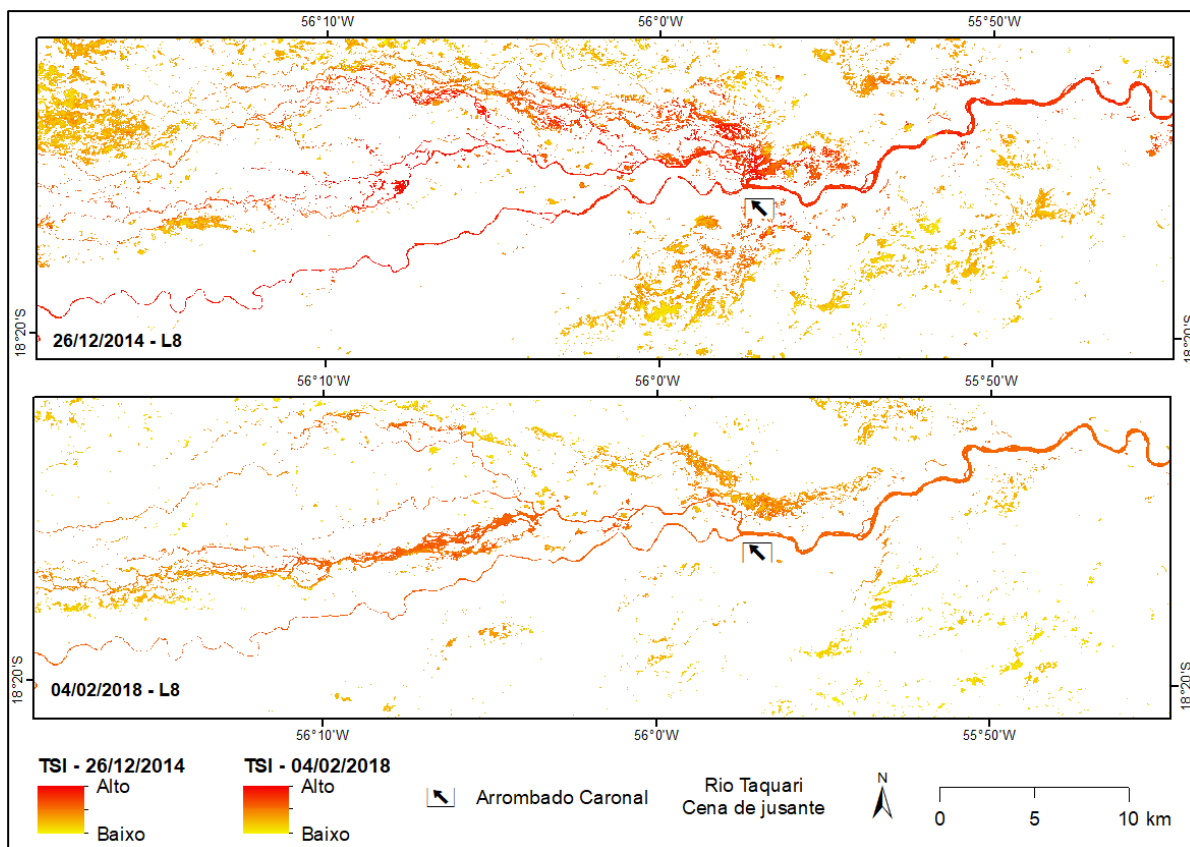


Figura 17. Fração TSI para a cena de jusante do rio Taquari, para 26/12/2014 e 04/02/2018.

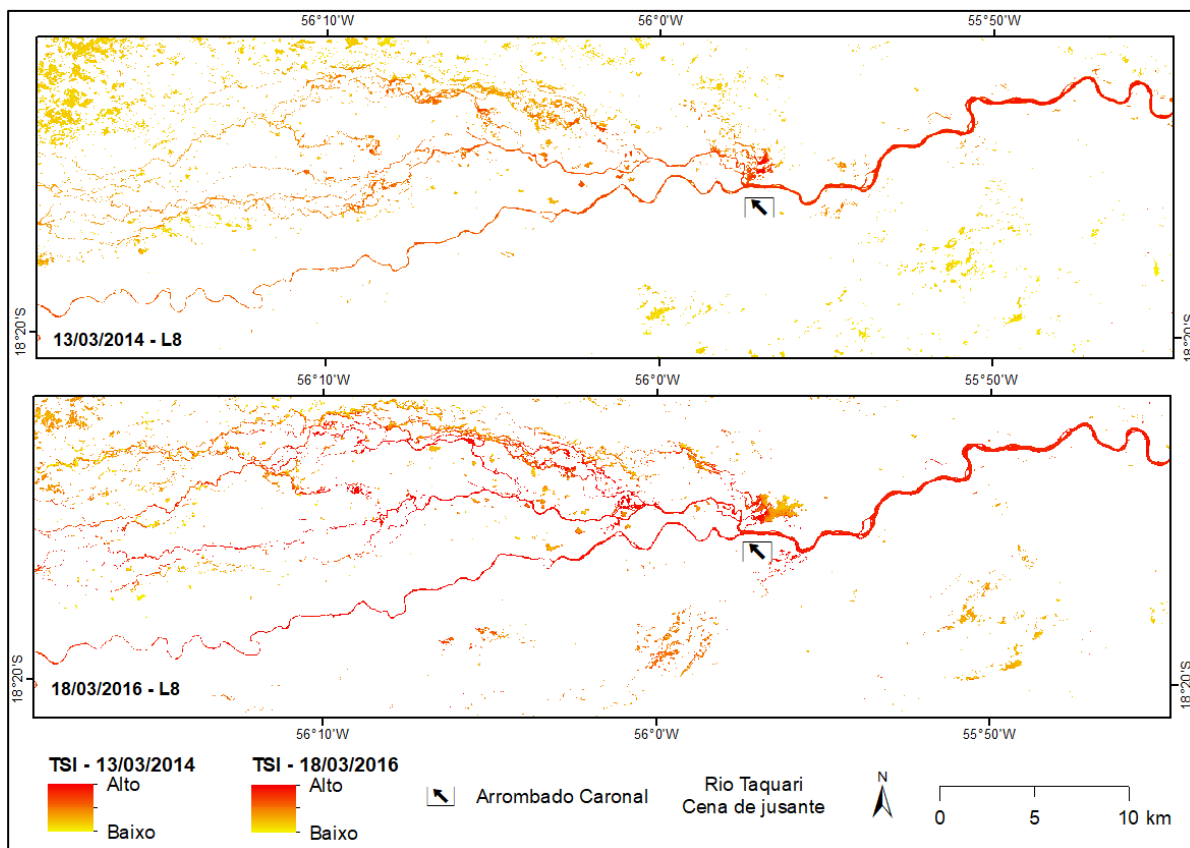


Figura 18. Fração TSI para a cena de jusante do rio Taquari, para 13/03/2014 e 18/03/2016.

6.2. Rio São Lourenço

Na análise do rio São Lourenço, observou-se que o resultado dos mapeamentos gerados pelo MNDWI para as imagens da cena de montante corrobora parcialmente com as informações coletadas na literatura. Foi utilizado como referência a compartimentação geomorfológica do megaleque do rio São Lourenço proposta por Corradini e Assine (2012), apresentada no item 4.2. O índice utilizado demonstrou que, assumindo comportamento similar ao do rio Taquari, no primeiro trecho do rio São Lourenço dentro do Pantanal não existe conexão direta entre a água do rio e os lobos deposicionais abandonados, apresentados na Figura 5.

É possível ver, na Figura 19, a ocorrência de conectividade lateral dentro do cinturão de meandros ativo, com a presença de meandros abandonados e pontos de extravasamento do rio que não se prolongam até a planície adjacente, inexistindo corpos d'água com fluxo contínuo do leito do rio até a planície de inundação. Nos produtos gerados pelo MNDWI da cena de montante ficam evidentes os padrões dos paleocanais no lobo distributário abandonado ao sul do rio São Lourenço, indicados com a seta preta na Figura 19.

Conforme observado pelos resultados desta pesquisa e pela literatura consultada, o megaleque do rio São Lourenço apresenta características similares ao do rio Taquari, cuja área onde ocorre conectividade lateral do rio com a planície coincide com a compartimentação geomorfológica proposta por Assine (2003). No caso do rio São Lourenço, o cinturão de meandros limita mais ou menos o local até onde ocorre a conexão lateral do rio com a planície de inundação, no início do megaleque.

Entretanto, é possível observar na Figura 20, indicado com a seta amarela, que existe um ponto de extravasamento das águas do rio São Lourenço a partir de sua margem direita, bem próximo à Pousada Tamanduá, que fica fora dos limites do lobo deposicional ativo mapeado pelos referidos autores. Deste modo, o mapeamento das áreas de conectividade lateral do rio São Lourenço considerou o traçado da compartimentação geomorfológica proposta por Corradini e Assine (2012) com adaptações, a fim de mapear também esta área onde ocorre extravasamento das águas na região a norte do rio.

A Figura 21 apresenta os resultados do MNDWI para a cena de jusante, com a somatória de todas as imagens analisadas (total de 7 imagens), e sobreposição da compartimentação geomorfológica de Corradini e Assine (2012). Nesta figura, também é possível observar a área inundada próxima a Pousada Tamanduá, que faz conexão direta com o leito do rio São Lourenço.

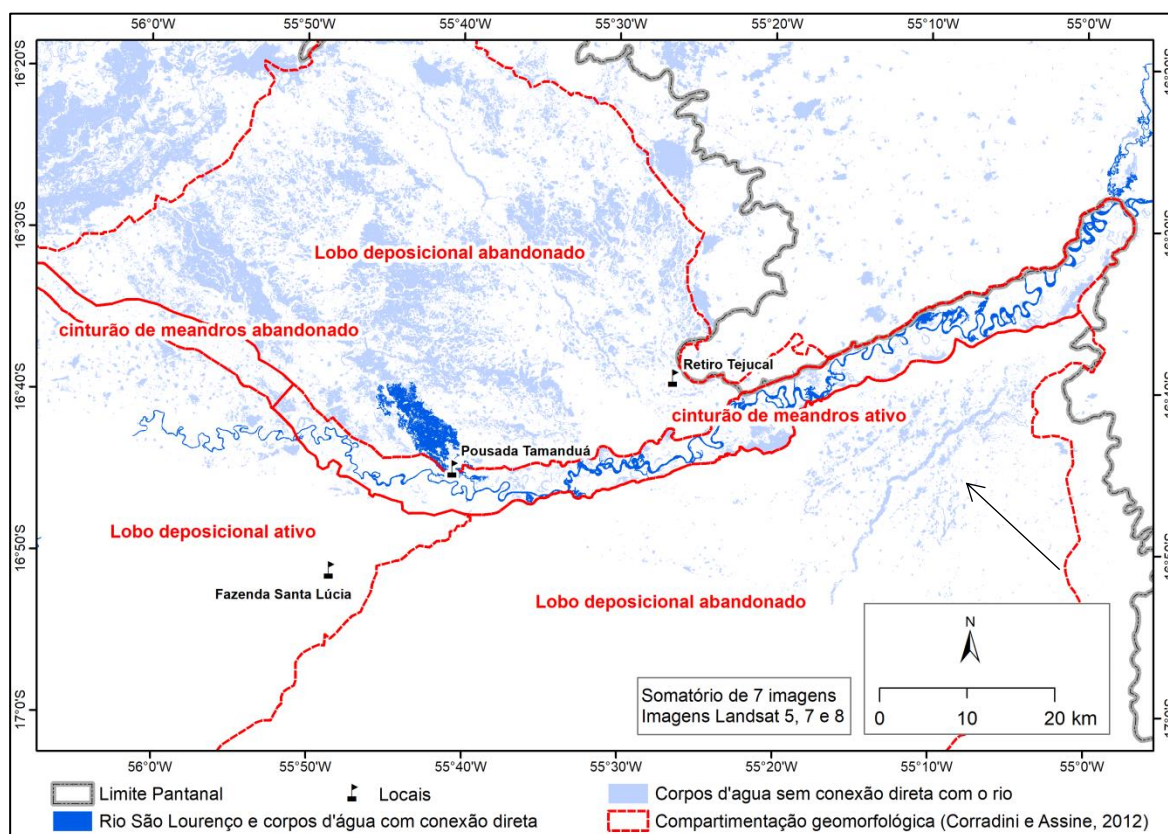


Figura 19. Resultado do MNDWI para a cena de montante do rio São Lourenço.

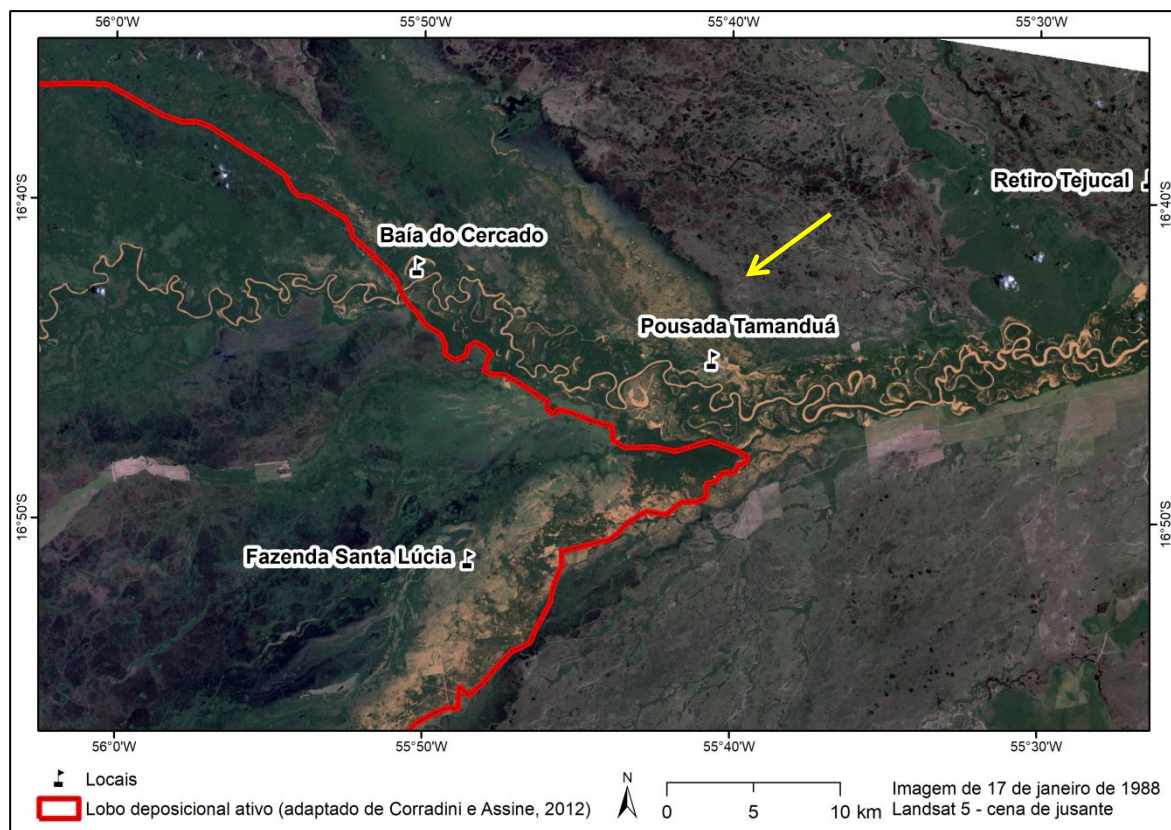


Figura 20. Ponto de extravasamento do rio São Lourenço próximo à Pousada Tamanduá, fora do lobo ativo delimitado por Corradini e Assine (2012), indicado pela seta amarela.

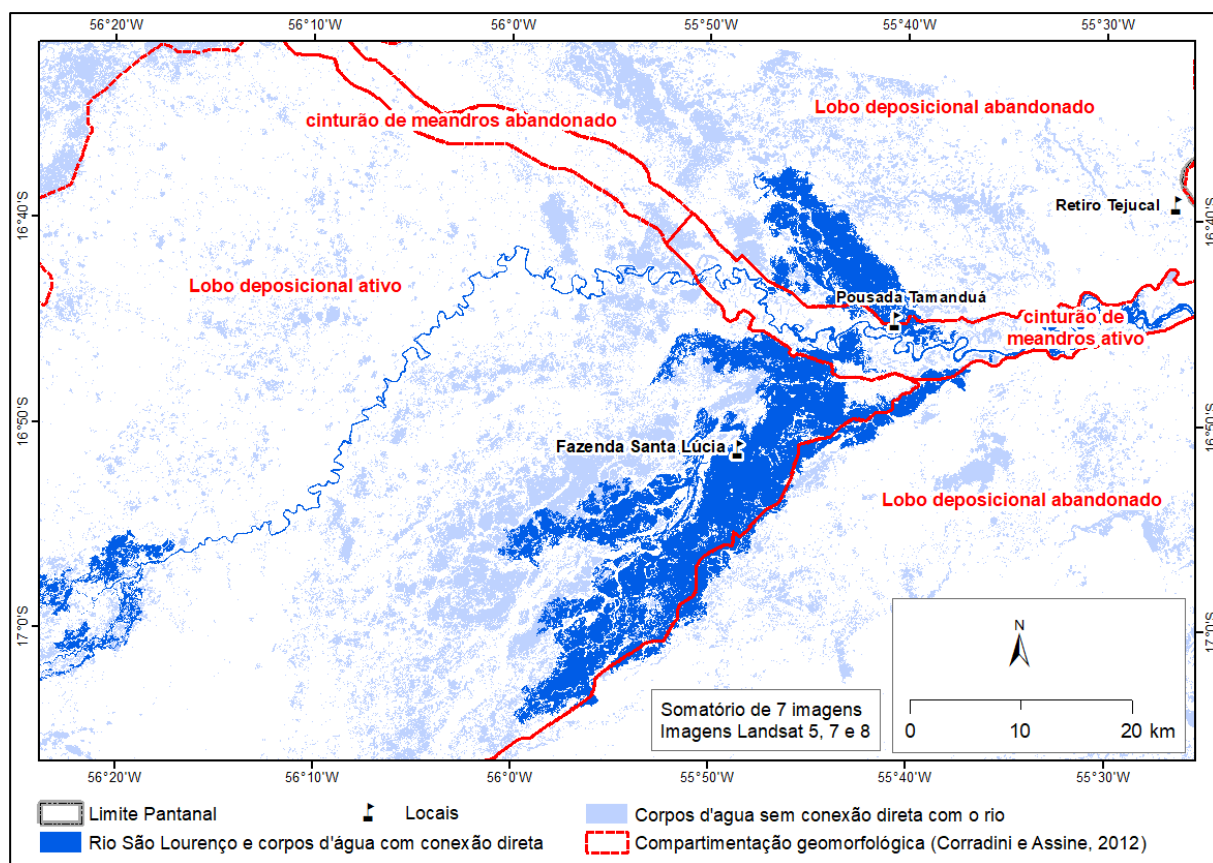


Figura 21. Resultado do MNDWI para a cena de jusante do rio São Lourenço.

A partir dos resultados gerados com o MNDWI, foram mapeadas as áreas onde ocorre conectividade lateral do rio São Lourenço com a planície, apresentadas na Figura 22. Utilizou-se como base a compartimentação geomorfológica do megaleque proposta por Corradini e Assine (2012), considerando o trecho do cinturão de meandro, porém adaptando a área do lobo deposicional ativo, de modo que abarcasse a inundação da localidade da Pousada Tamanduá. Conclui-se que o rio São Lourenço começa a extravasar suas águas para a planície a partir das proximidades da referida Pousada, na margem direita; e mais a jusante, pela margem esquerda, com maior magnitude de inundações.

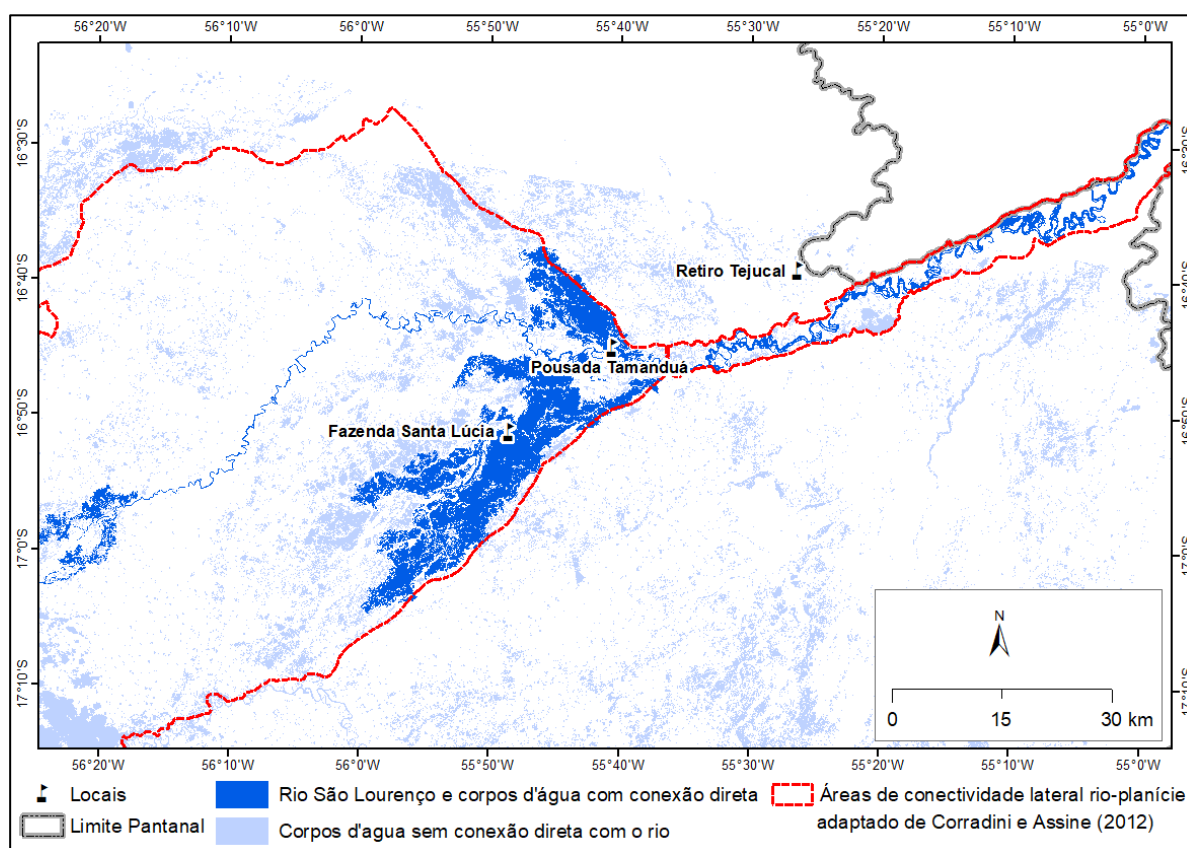


Figura 22. Resultado do MNDWI e delimitação da área de conectividade lateral do rio São Lourenço.

Com relação aos dados de propagação dos impactos de variação sub-diária das vazões nos rios a partir do ponto de instalação das hidrelétricas, no caso do rio São Lourenço, no primeiro contato do rio com a borda do Pantanal, o impacto equivale a 8,53%, decaindo em direção a jusante (Figura 23). No local onde ocorrem os primeiros pontos de extravasamento do rio e conectividade lateral com a planície,

localizado a aproximadamente 151 km após a borda do Pantanal, os impactos totalizam 3,35%. Os impactos vão decaindo em direção a jusante, até o ponto de localização de uma usina localizada no rio em pleno Pantanal, neste ponto que teria um impacto de 100%. Esta usina (PCH São Judas Tadeu), entretanto, possui status de revogada e não será efetivada sua construção, podendo neste caso desconsiderar os impactos advindos da mesma.

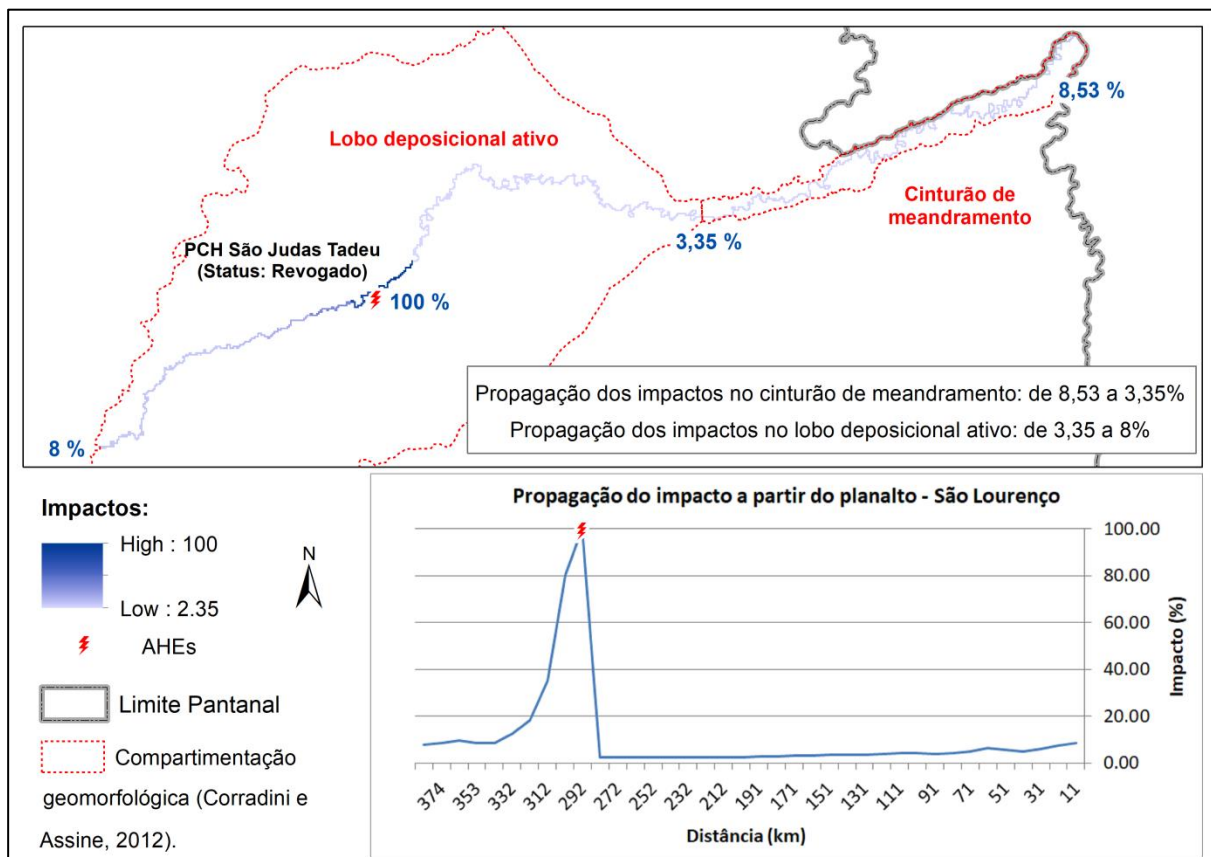


Figura 23. Propagação do impacto de variação sub-diária das vazões a partir do planalto - rio São Lourenço.

O modelo de mistura para a fração TSI (sedimentos inorgânicos) demonstra comportamento similar ao identificado pelas análises realizadas, reforçando o fato de que no trecho inicial do rio São Lourenço no Pantanal, onde se encontra delimitado pelo cinturão de meandramentos, existe diferença na composição sedimentar do leito do rio e das demais águas na planície.

As Figuras 24 e 25 apresentam o modelo de mistura da cena de montante, onde se observa a diferença na tonalidade dos sedimentos das águas: em vermelho, o TSI no leito do rio, e nos demais corpos d'água, cores mais claras.

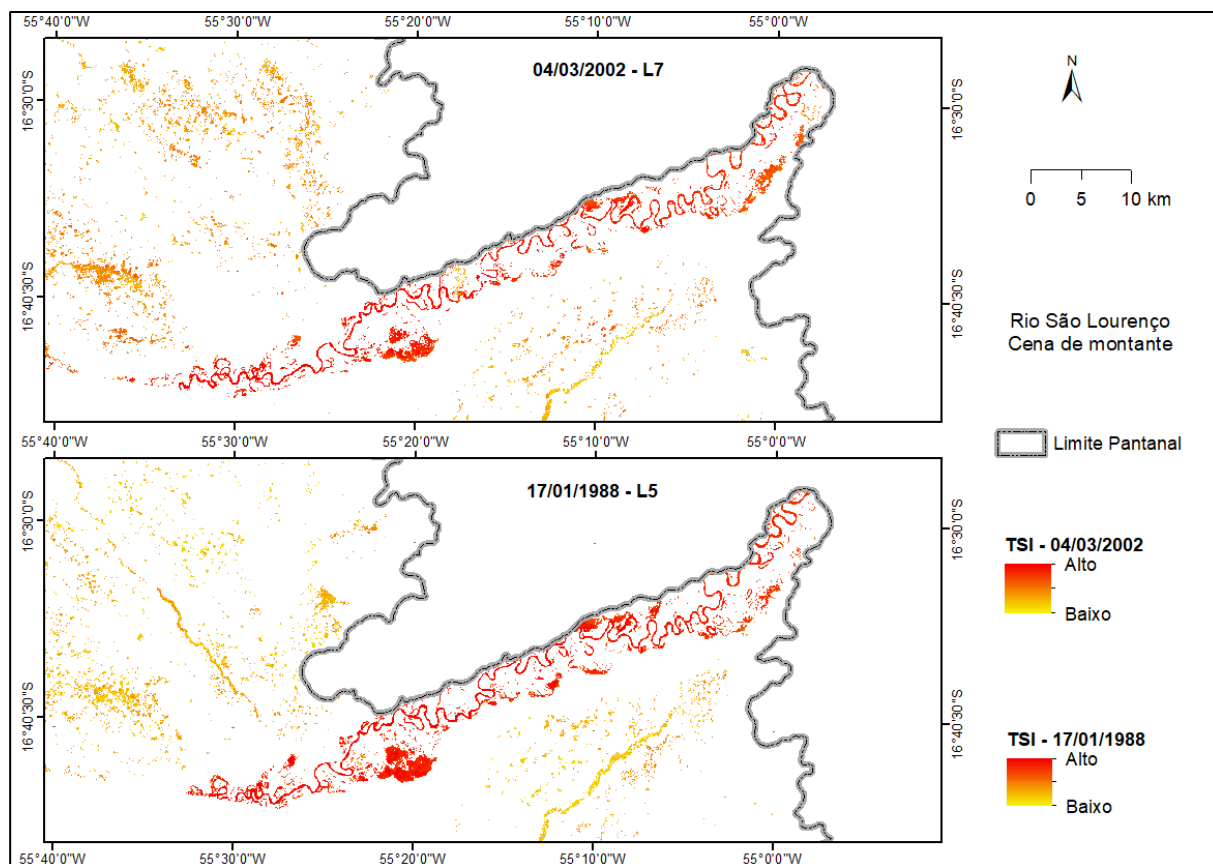


Figura 24. Fração TSI para a cena de montante do rio São Lourenço, para 04/03/2002 e 17/01/1988.

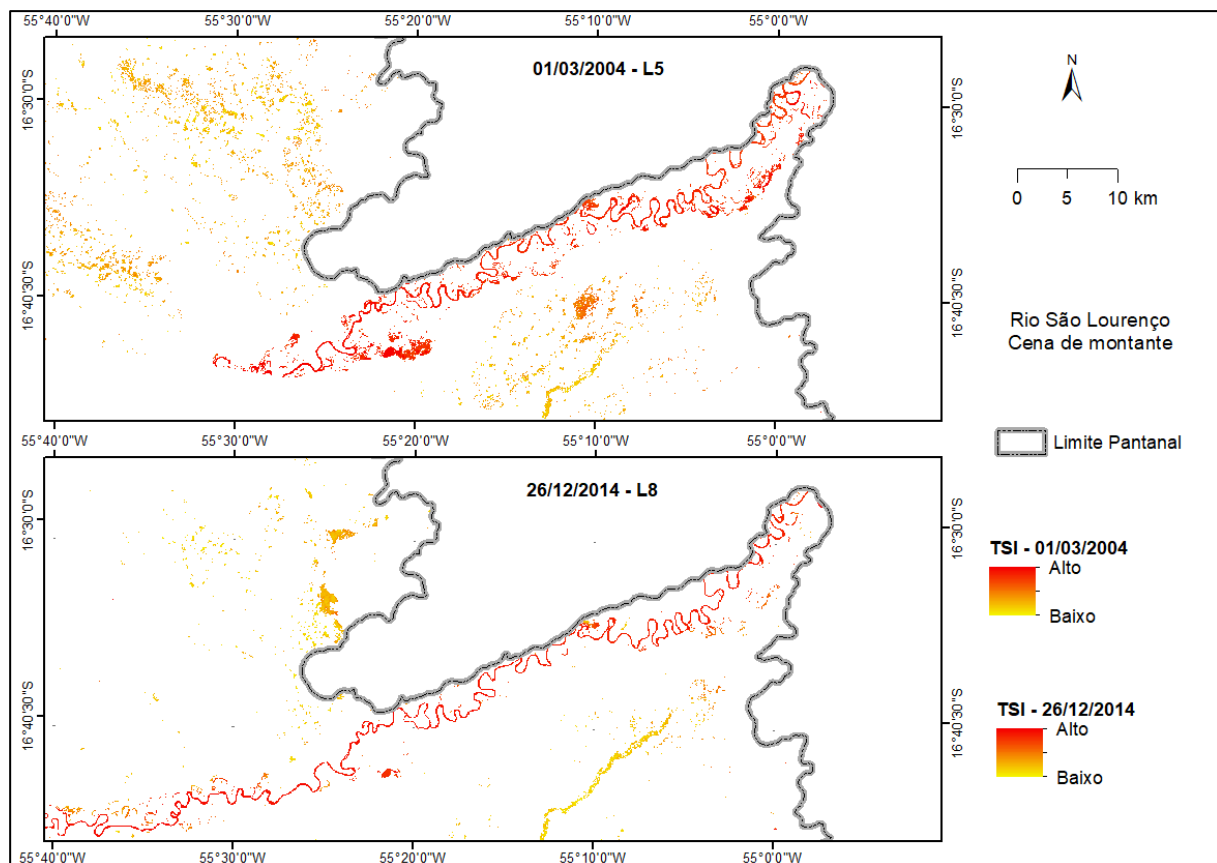


Figura 25. Fração TSI para a cena de montante do rio São Lourenço, para 01/03/2004 e 26/12/2014.

Para a cena de jusante, o modelo de mistura demonstrou a influência do rio São Lourenço nas mediações da Fazenda Tamanduá, conforme apresentado na Figura 20. A Figura 26 apresenta a fração TSI pra a cena da mesma data da Figura 20, onde se observa a contribuição expressiva de pixels inorgânicos na planície, em cor vermelha e laranja escuro. As demais imagens geradas também demonstram este mesmo comportamento.

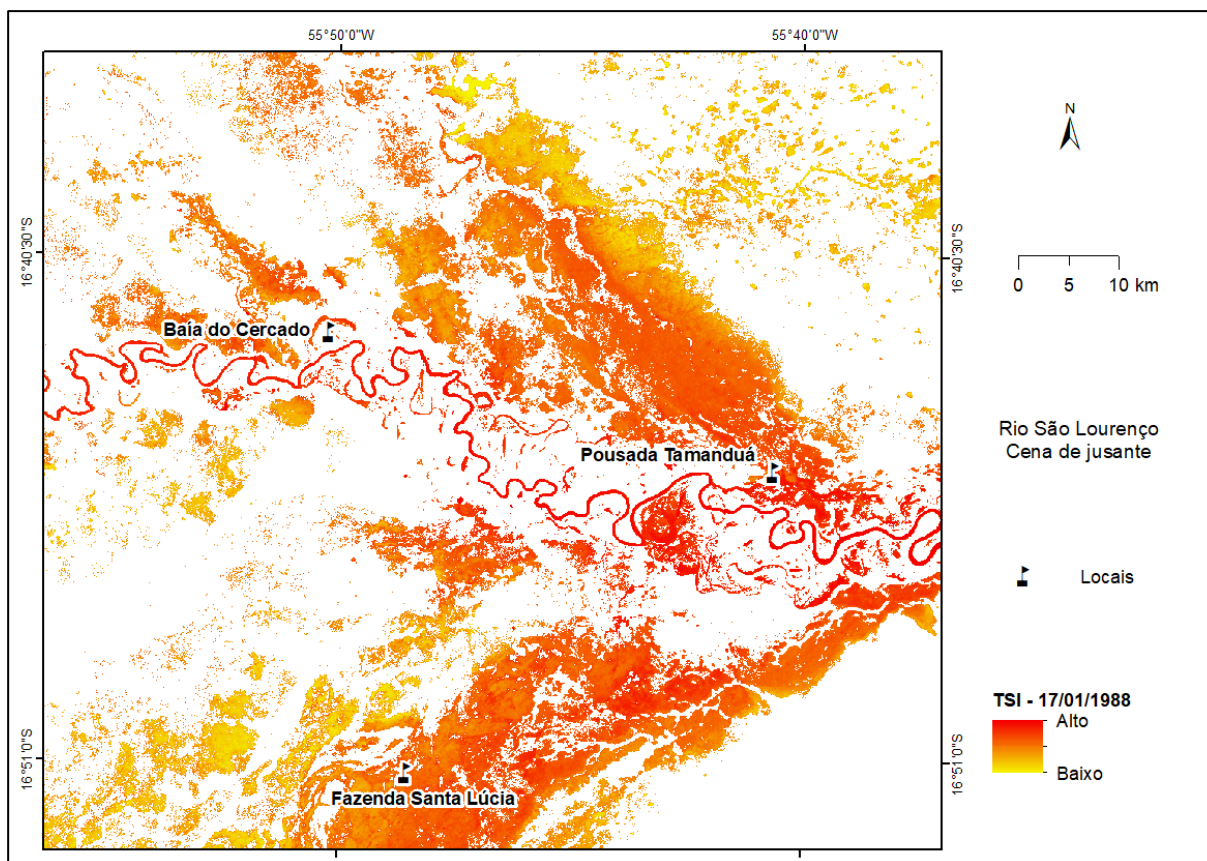


Figura 26. Fração TSI para a cena de jusante do rio São Lourenço, para 17/01/1988.

6.3. Rio Cuiabá

Na análise do rio Cuiabá, observou-se que o resultado dos mapeamentos gerados pelo MNDWI para as imagens da cena de montante corrobora parcialmente com as informações coletadas na literatura. Foi utilizada como referência a compartimentação geomorfológica do megaleque do rio Cuiabá proposta por Pupim (2014), apresentada no item 4.3.

Como já apresentado na Figura 6, no item 4.3, Pupim (2014) propôs a compartimentação geomorfológica do rio Cuiabá, identificando no trecho inicial dentro do Pantanal que o rio percorre a compartimentação de Planície fluvial confinada, com canal meandrante. A área ao norte desta compartimentação não é considerada como parte do megaleque do Cuiabá, e a área ao sul foi identificada como Paleoleque do Cuiabá, e segundo o autor, nenhuma destas duas regiões recebe inundações a partir de extravasamento de água do rio Cuiabá. Também para Padovani (2010), estas áreas não recebem inundações por água do canal do rio

Cuiabá, sendo a área ao norte condicionada ao escoamento e recebimento das águas que vem da precipitação das bacias de montante, à norte, cuja inclinação do terreno se dá no sentido de nordeste a sudoeste.

O resultado gerado pelo MNDWI nesta pesquisa, entretanto, identificou que existe uma conexão entre o rio Cuiabá e essas duas áreas, como se observa na Figura 27, na cor azul escuro, que delimita o canal do rio Cuiabá e as áreas conectadas a ele identificadas nas imagens de satélite processadas entre 1985 a 2018. Assim, foram buscadas evidências para compreender melhor as conexões entre os corpos d'água presentes nesta região.

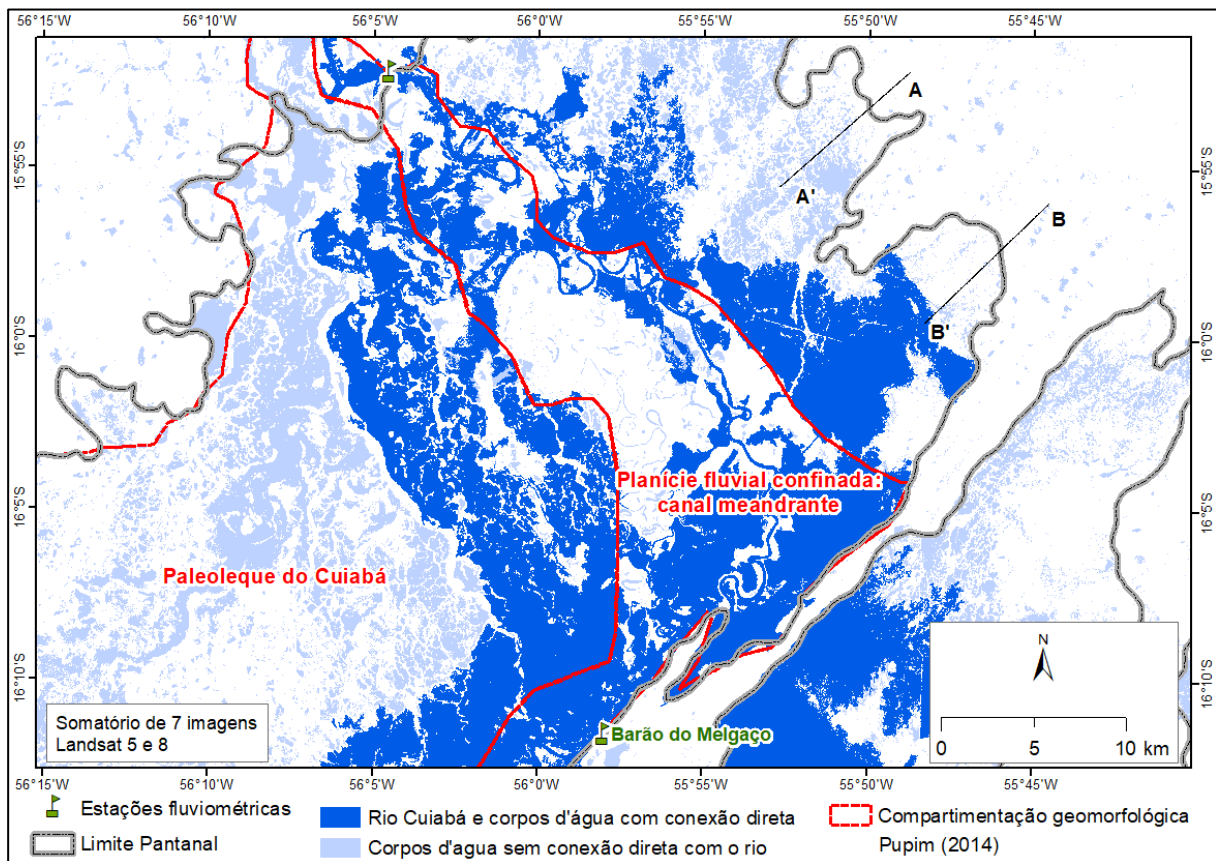


Figura 27. Resultado do MNDWI para a cena de montante do rio Cuiabá.

Com os dados SRTM, foram traçados os perfis topográficos A e B (como se observam na Figura 27) cujos gráficos se observam na Figura 28, apresentando declividades decaindo na direção de nordeste para sudoeste. O sentido da inclinação do terreno drenaria a água da precipitação local diretamente para as

áreas inundadas em análise, confirmando as informações apresentadas por Padovani (2010).

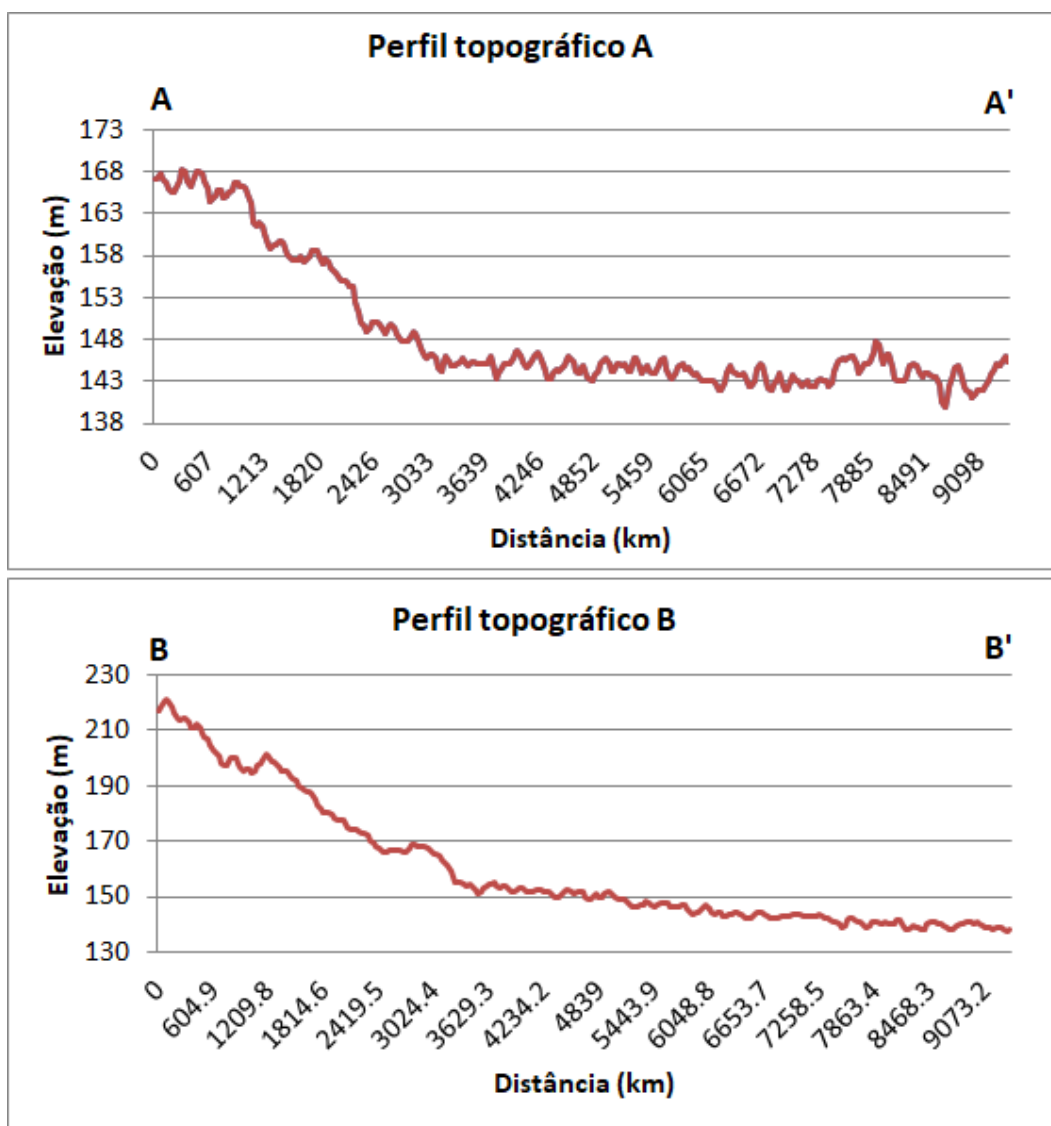


Figura 28. Perfis topográficos da área adjacente ao rio Cuiabá.

Entretanto, uma análise das imagens em composição colorida falsa-cor indicou a possibilidade de haver conexão com o rio Cuiabá neste setor, mesmo que em menor escala, visto que as águas desta área apresentam coloração semelhante à do rio, em tons azuis (Figura 29), indicando a presença de sedimentos em suspensão, diferentemente de águas de planície que normalmente apresentam tonalidades na cor preta. Essa situação ocorre nas imagens mais antigas, de 1988, 1989, 1993, 1996 e 2002, sendo mais expressiva para os anos de 1988 a 1989.

É possível observar ainda, na Figura 30, estreitos canais que fazem a conexão entre o canal do rio Cuiabá e as áreas inundadas, indicados com as setas pretas. A Figura 31 apresenta uma imagem do Google Earth registrada no dia 10 de julho de 2019, onde é possível observar o estreito canal indicado pela seta direcional para cima na Figura 30, ligando o rio Cuiabá à lagoa alongada indicada com seta vermelha desta mesma figura.

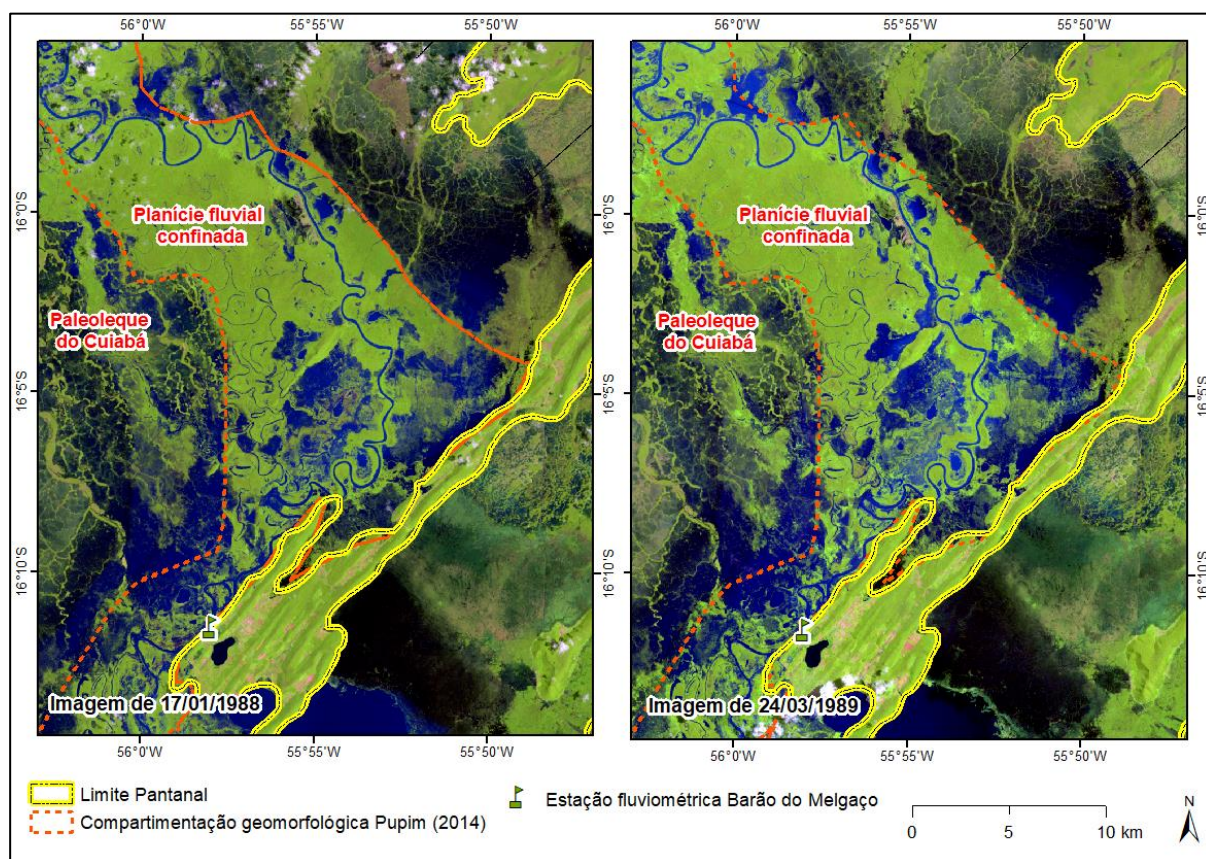


Figura 29. Água com tonalidade azul na região inundada ao norte do megaleque do Cuiabá, indicando possibilidade de influência do rio.

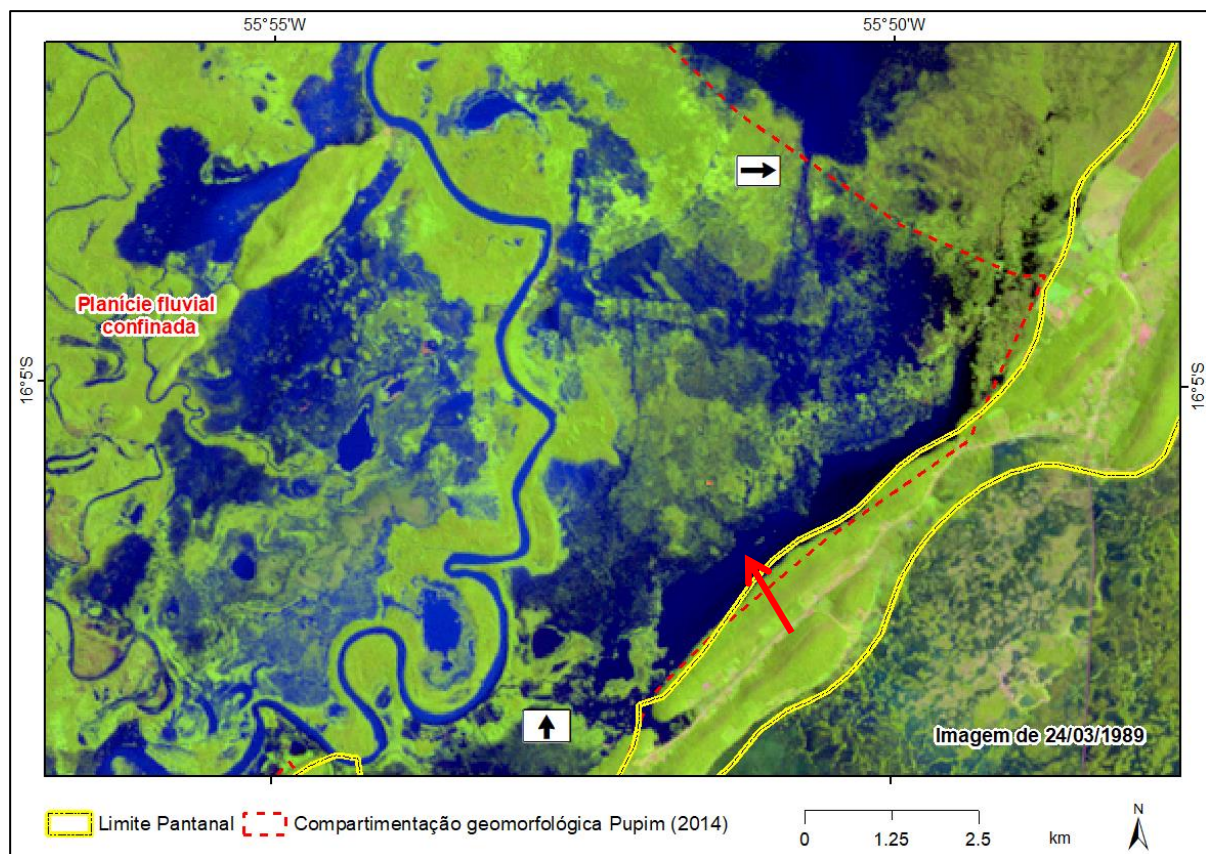


Figura 30. Canais estreitos ligando o rio às áreas inundadas, indicados pelas setas pretas. Seta vermelha indica a lagoa conectada ao rio Cuiabá.



Figura 31. Imagem de alta resolução do Google Earth indicando, com seta vermelha, o canal estreito ligando o rio Cuiabá à lagoa.

Fonte: Google Earth.

Segundo Pupim (2014), a área inundada ao sul do rio Cuiabá, localizada dentro da compartimentação geomorfológica do paleoleque do Cuiabá, também não é inundada por extravasamento da água do leito do rio, mas sim por fluxos de água que coincidem com os períodos de maior precipitação na área. O autor analisou os dados das estações fluviométricas de Cuiabá (que fica a montante, na cidade de Cuiabá) e de Barão do Melgaço, localizada a jusante das áreas inundadas, e identificou que neste trecho não existe diminuição nas vazões médias do rio Cuiabá (Figura 32), o que corrobora com a afirmação de que, neste setor, não existe perda de água do rio para inundações locais.

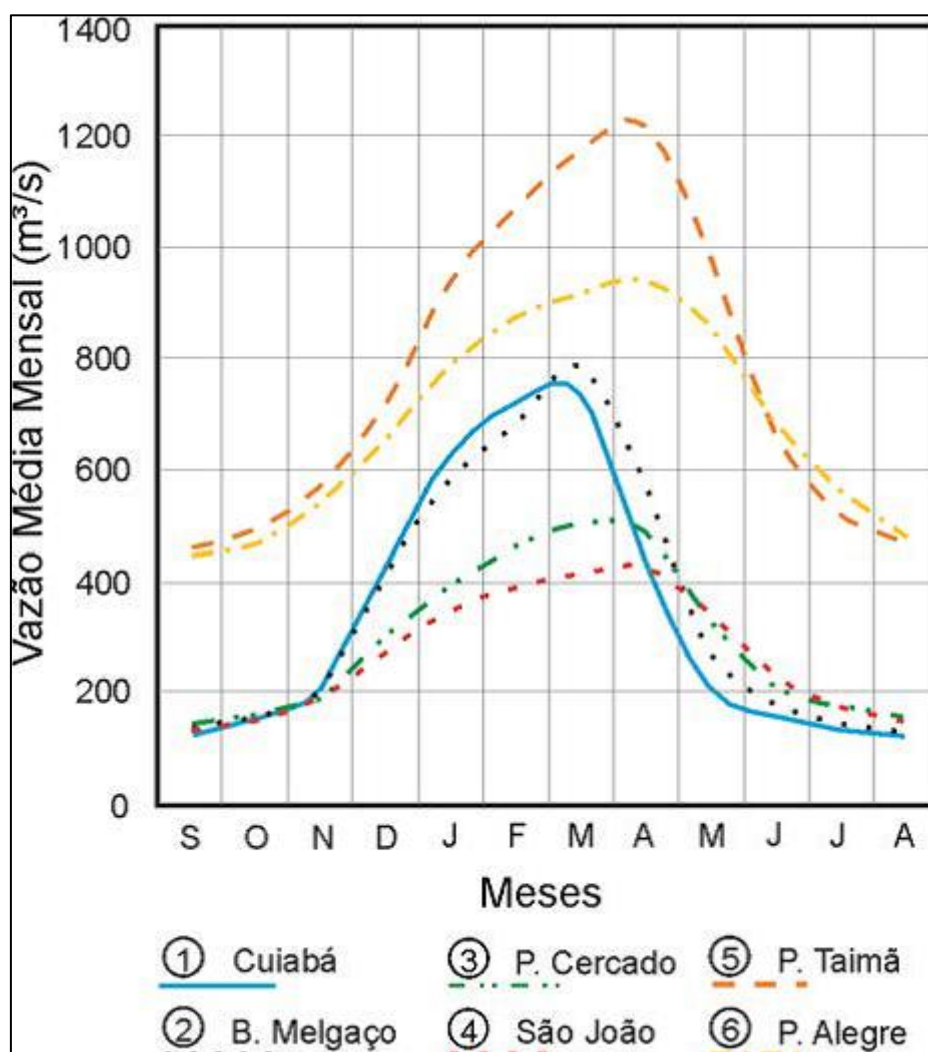


Figura 32. Vazões médias mensais de 1997 a 2003. Fonte: Pupim (2014).

Mesmo que estas regiões a norte do megaleque e no paleoleque do Cuiabá não recebam água de extravasamento direto do rio Cuiabá, existem canais estreitos que

fazem uma conexão do rio principal com os corpos d'água. Estes pequenos canais são importantes do ponto de vista principalmente da comunidade de peixes, conseqüentemente para a biodiversidade e para a pesca locais. Desta maneira, há que se considerar tais regiões como passíveis de sofrerem modificações por impactos causados pelas usinas hidrelétricas, visto que existe a conexão entre o rio e a planície.

Na compartimentação geomorfológica denominada de Planícies Fluviais Confinadas, é possível observar pontos de extravasamento do rio Cuiabá, além da bifurcação do canal na altura da cidade de Barão do Melgaço (Figura 33), onde corre um canal de menor porte, denominado rio Piraim (Pupim, 2014).

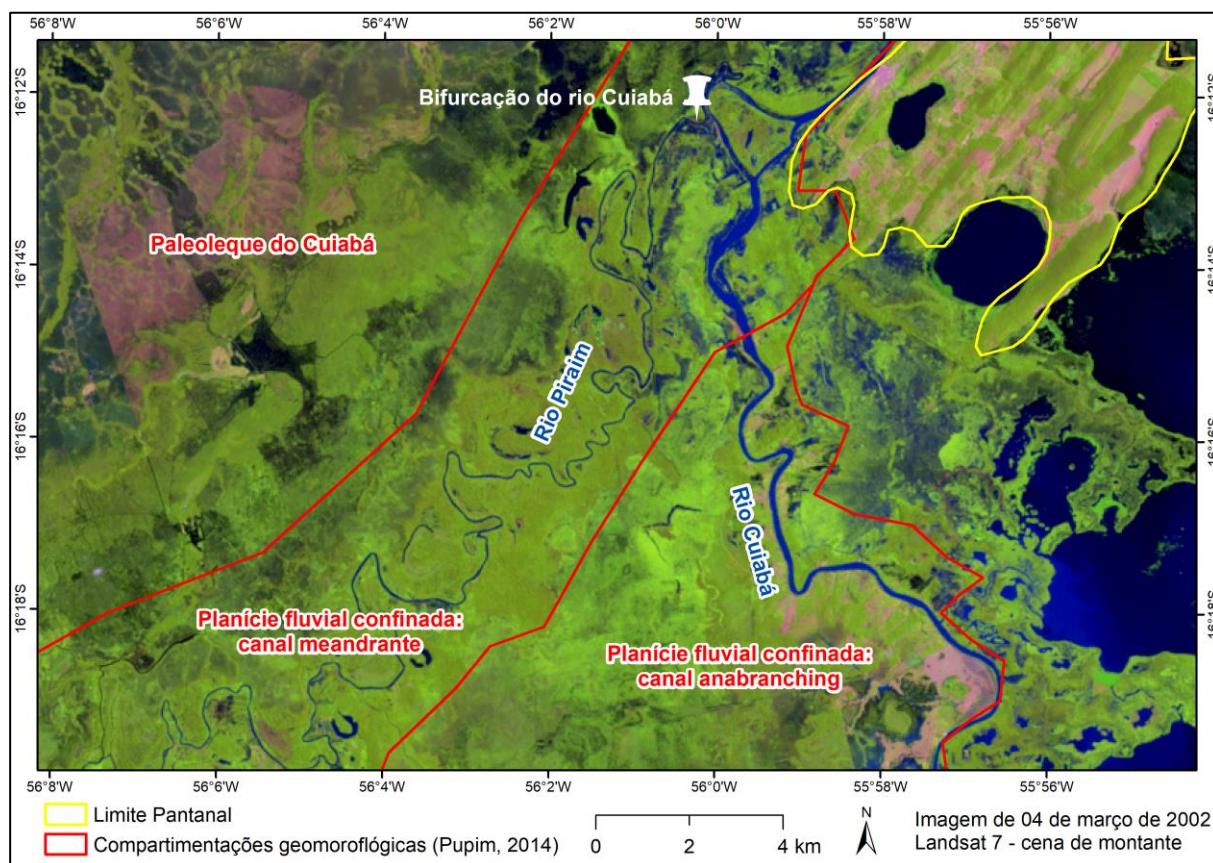


Figura 33. Localização da bifurcação do rio Cuiabá, dando origem ao rio Piraim. Composição colorida falsa-cor. Cena de montante.

A Figura 34 apresenta uma área mais a jusante, onde se observam pontos de extravasamento do rio Cuiabá dentro da compartimentação de Planície fluvial confinada canal anabranching.

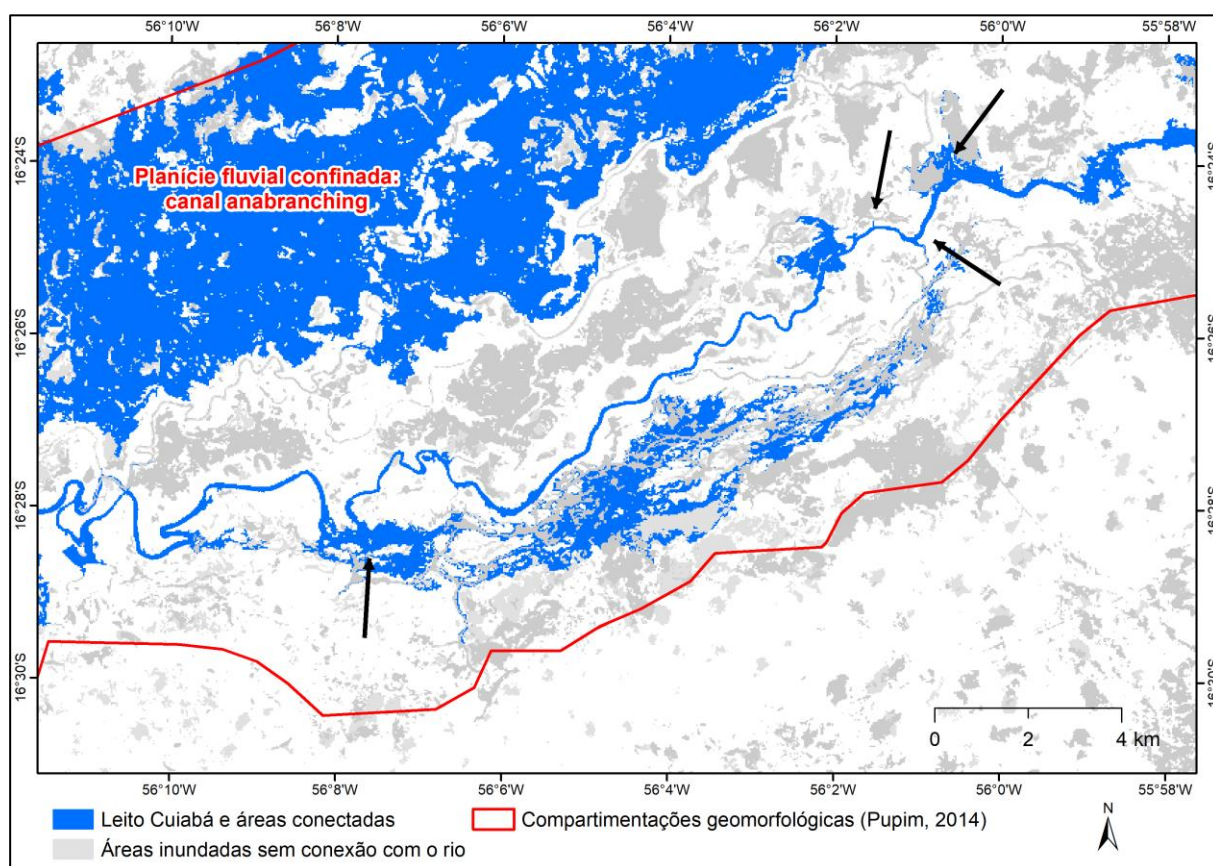


Figura 34. Pontos de extravasamento do rio Cuiabá, indicados com as setas pretas. Cena de montante.

As cenas de jusante e jusante 2 abrangem trechos em que também existem pontos de extravasamento das águas do rio Cuiabá, tanto na margem esquerda quanto na direita, como se observam nas Figuras 35 e 36 (pontos indicados com seta preta).

Na cena jusante 2 (Figura 36), o trecho com maior extravasamento da água do rio Cuiabá se localiza bem próximo à sua foz, nas proximidades do encontro com o rio Paraguai, onde há um complexo de lagoas próximas aos rios. As lagoas que se conectam ao rio Cuiabá, fazem uma conexão com lagoas que se conectam ao rio Paraguai, se tornando um grande corpo d'água unindo os rios Paraguai e Cuiabá, em períodos de cheias mais expressivas.

Diferentemente do Taquari e do São Lourenço, logo na entrada do rio no Pantanal existe conexão entre o leito do rio Cuiabá e as áreas inundadas, ainda que nesta área não haja perda de água o rio para a planície.

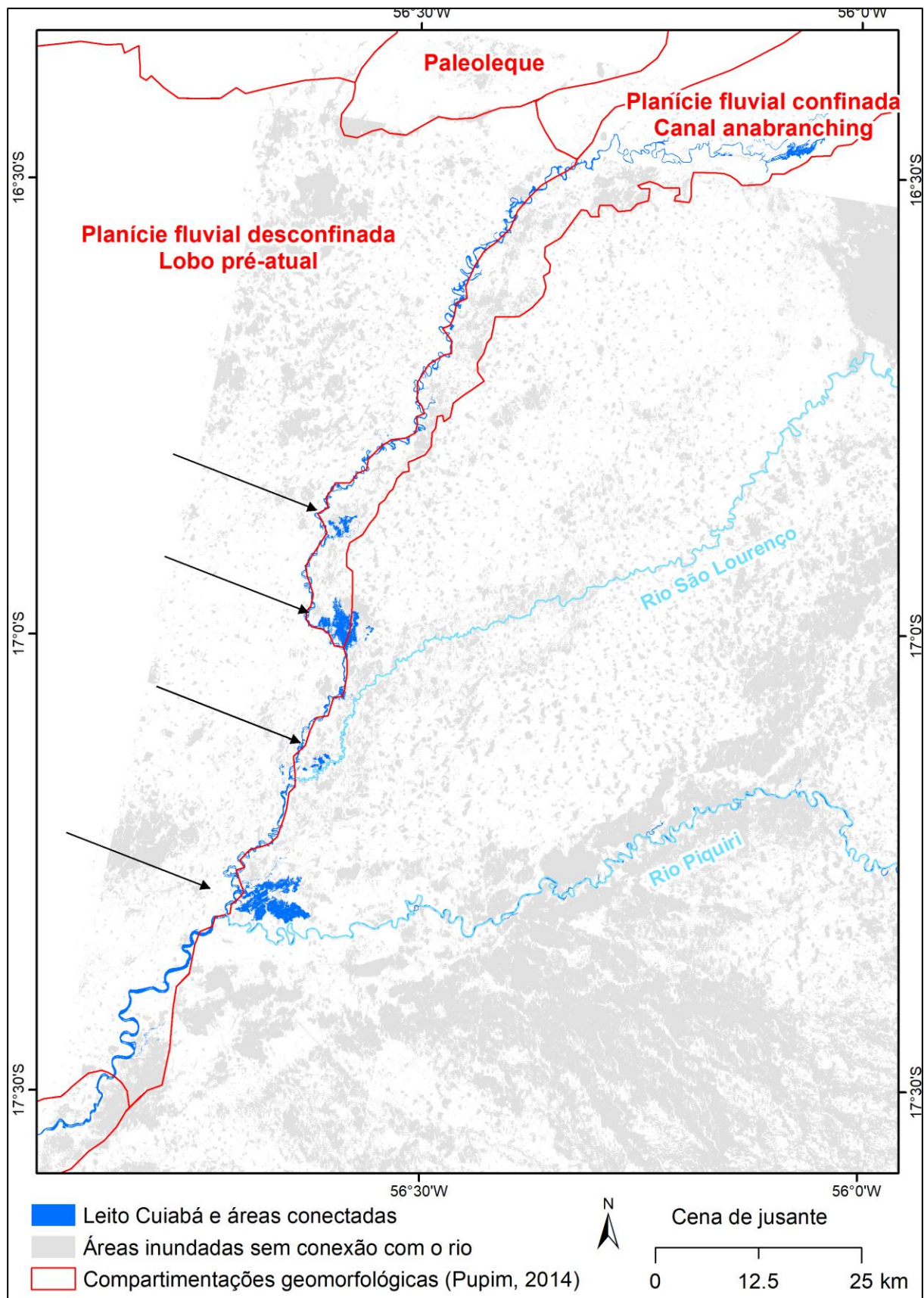


Figura 35. Pontos de extravasamento do rio Cuiabá, indicados com as setas pretas. Cena de jusante.

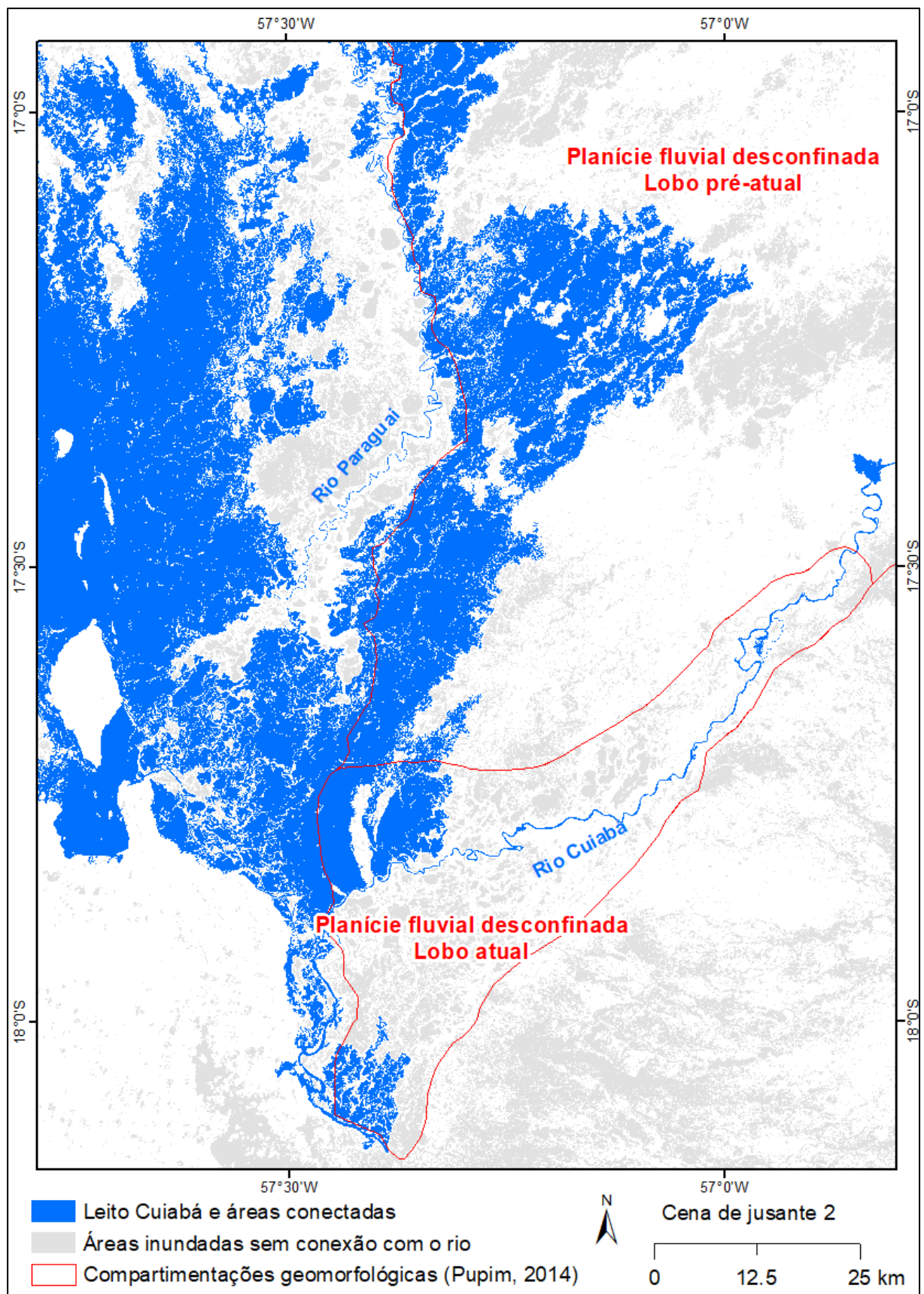


Figura 36. Pontos de extravasamento do rio Cuiabá, indicados com as setas pretas. Cena de jusante 2.

Com relação aos dados de propagação dos impactos de variação sub-diária das vazões dos rios a partir do ponto de instalação das hidrelétricas, no caso do rio Cuiabá, apresenta-se uma situação diferenciada. Logo ao adentrar no Pantanal, existe conectividade do rio com a planície, ainda que não haja, neste primeiro setor, diminuição da vazão. No primeiro contato do rio Cuiabá com a borda do Pantanal, o impacto calculado equivale a 5,5%, decaindo até 2,95% até a localidade da estação fluviométrica Barão do Melgaço.

Pupim (2014) observou que ocorre diminuição de vazão do rio Cuiabá a partir da estação fluviométrica Barão do Melgaço, localizada a aproximadamente 115 km após o limite do Pantanal, por conta de pontos de extravasamento das águas do rio. Daí em diante, os impactos decaem de 2,95% em direção a jusante até 1,74%, antes do local onde ocorre a confluência do rio São Lourenço, indicado em verde na Figura 37, a partir do qual há um aumento nos valores dos impactos para 4,3%. Este aumento, entretanto, ocorre por conta da localização da usina no leito do rio São Lourenço, que seguiria carregando os impactos em direção a jusante para o rio Cuiabá. Como foi abordado logo acima, a referida usina não será efetivada, sendo possível desconsiderar os impactos advindos da mesma. Ainda que se considerem os impactos da usina, seguindo em direção a jusante, os níveis do impacto voltam a decair até alcançar 0% em sua foz, onde deságua no rio Paraguai.

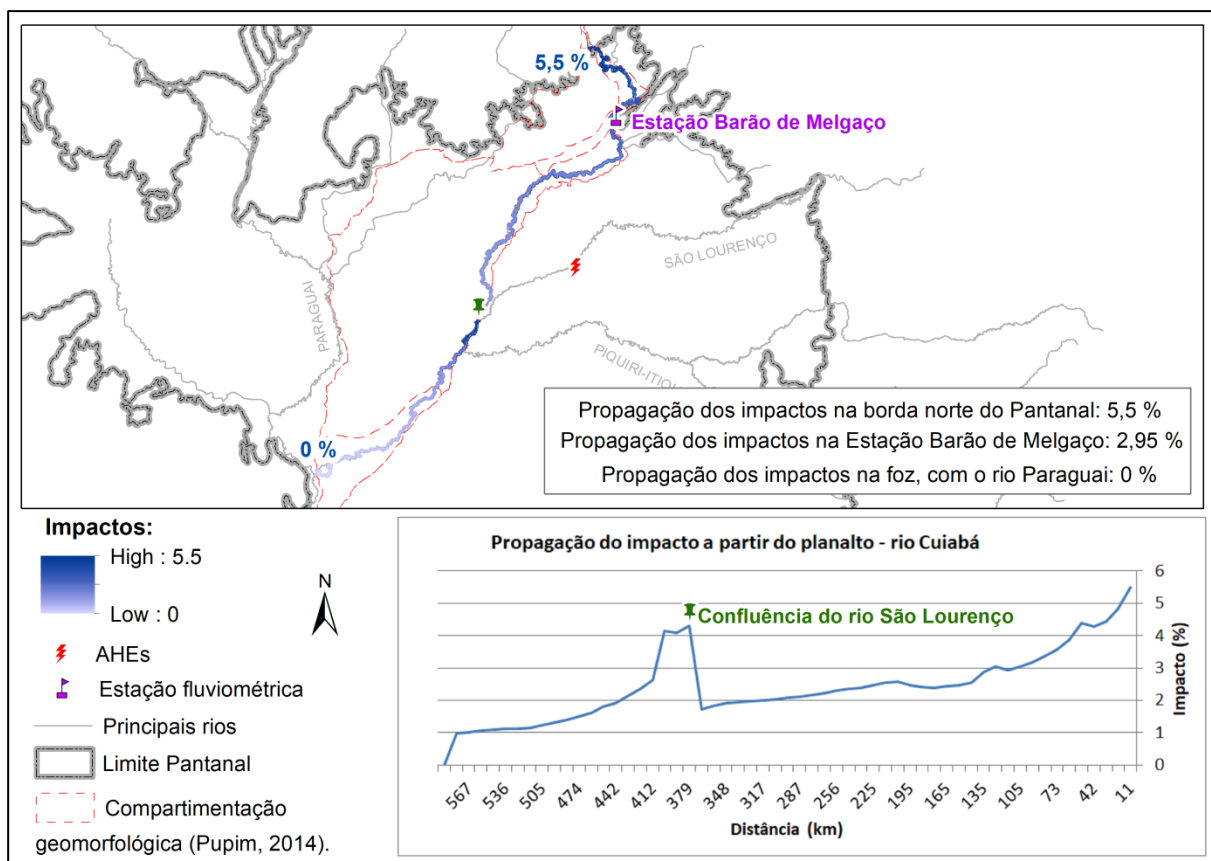


Figura 37. Propagação do impacto de variação sub-diária das vazões a partir do planalto - rio Cuiabá.

O modelo de mistura gerado para a fração TSI para a cena de montante mostrou a influência do rio Cuiabá nas áreas inundadas na compartimentação geomorfológica de planícies fluviais confinadas. É possível observar o comportamento dos sedimentos inorgânicos fluindo para o rio Piraim, onde ocorre bifurcação do canal do Cuiabá, na Figura 38, além da contribuição do rio Cuiabá também para a lagoa Chacororé. Na Figura 38, fica evidente o transporte de sedimentos do rio Cuiabá para a lagoa através de um canal estreito indicado com a seta preta, e o espraiamento dos sedimentos pela lagoa, na cor alaranjada, da mesma cor do rio.

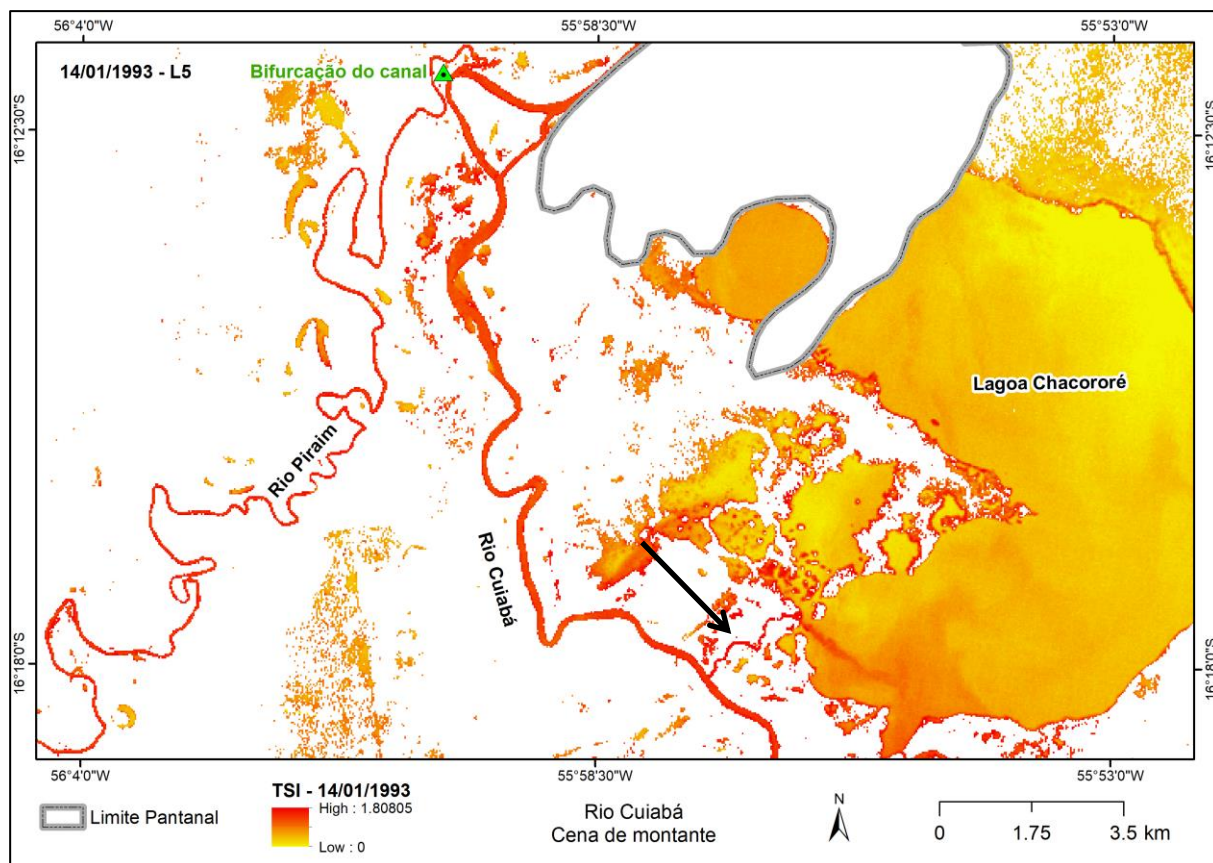


Figura 38. Fração TSI para a cena de montante do rio Cuiabá, para 14/01/1993.

Para as cenas de jusante e jusante 2, o modelo de mistura apresentou o comportamento esperado e já descrito anteriormente, com pontos de extravasamento do rio Cuiabá para a planície em pequenos trechos. Na cena de jusante, a área inundada sob influência do rio Cuiabá é pouco expressiva, e se prolonga numa faixa estreita próxima ao rio, sendo que o sistema do megaleque do rio Cuiabá é limitado à oeste pelos megaleque do São Lourenço.

A Figura 39 apresenta a fração TSI para a cena de jusante, apresentando a região antes da confluência do rio São Lourenço com o Cuiabá. Nesta região, a concentração de TSI para o rio Cuiabá se apresenta menor que na cena de montante, com tonalidades mais claras para a cor laranja, e se confunde com as águas da planície.

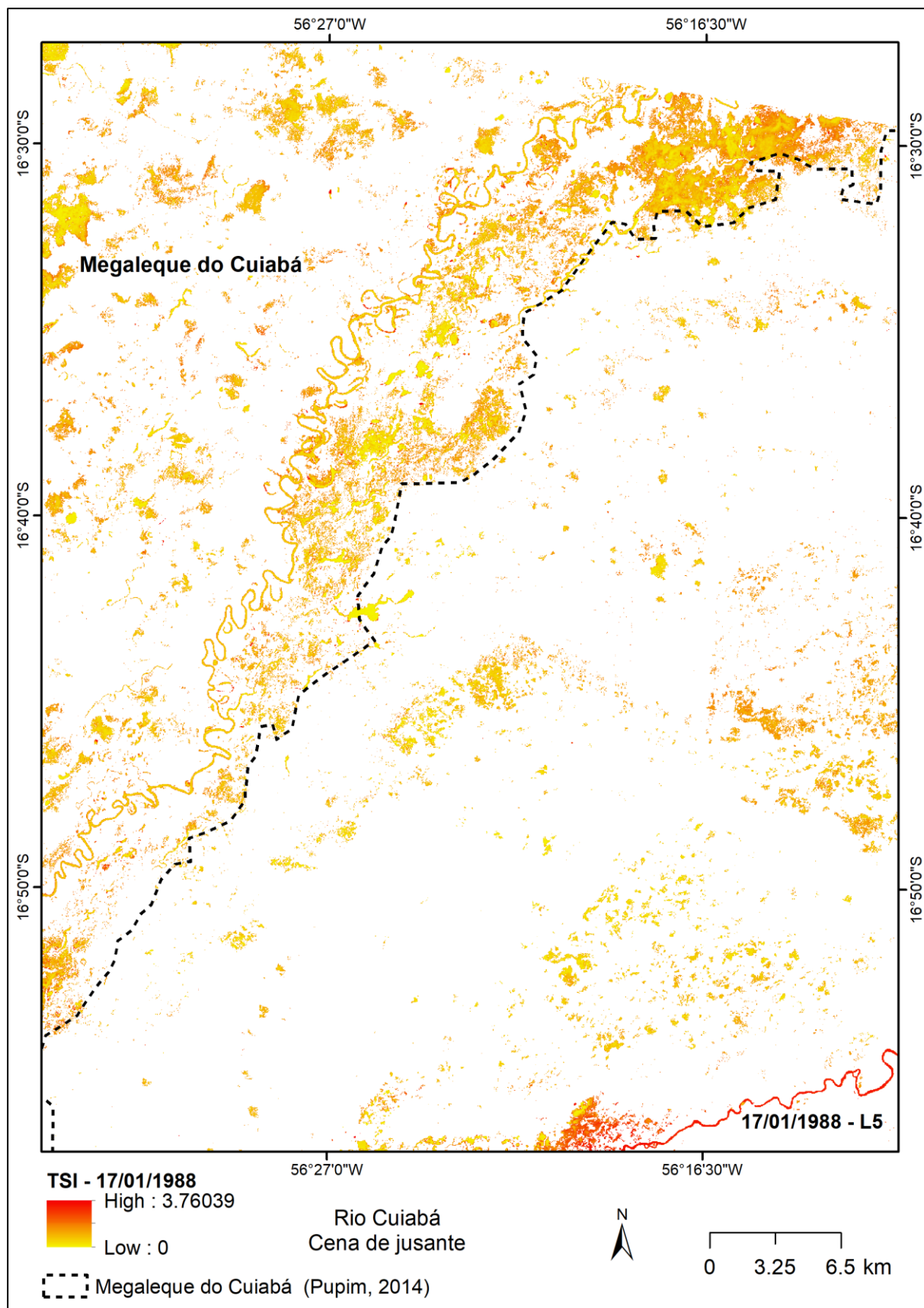


Figura 39. Fração TSI para a cena de jusante do rio Cuiabá, para 17/01/1988.

6.4. Rio Paraguai

O resultado dos mapeamentos gerado pelo MNDWI coincide com a compartimentação geomorfológica realizada por Silva (2010), e descrita no item 4.4. Dadas as características geomorfológicas do local, ao adentrar o Pantanal, o rio Paraguai se encontra entrincheirado no cinturão de meandros e não há conexão lateral entre as águas do rio e o Pantanal, como se observa na Figura 40.

A partir da localidade conhecida como baía das éguas, o rio Paraguai se bifurca em torno da ilha de Taiamã (indicado com a seta preta na Figura 40) e os processos de avulsão fazem com que parte da água do leito flua para a planície, contribuindo ativamente para as inundações locais. É a partir deste ponto que o rio Paraguai começa a contribuir com as inundações da planície do Pantanal.

A Figura 41 apresenta o resultado do mapeamento pelo MNDWI para a cena de jusante. Nesta imagem, é possível observar que o rio Paraguai permanece com leito definido até a ilha de Taiamã, na cor azul escuro. A partir desta área, o rio se divide e se mistura com as demais águas da planície, contribuindo significativamente para extensas áreas inundadas. A partir deste ponto, o canal do rio Paraguai se torna mais estreito e difuso com os demais corpos d'água da planície. Por este motivo, a seleção da feição do canal do rio acaba abarcando uma área expressiva de corpos d'água da planície, não sendo possível identificar com clareza quais são as áreas diretas de contribuição do rio Paraguai para as inundações locais, visto que uma grande massa de água presente na planície se conecta.

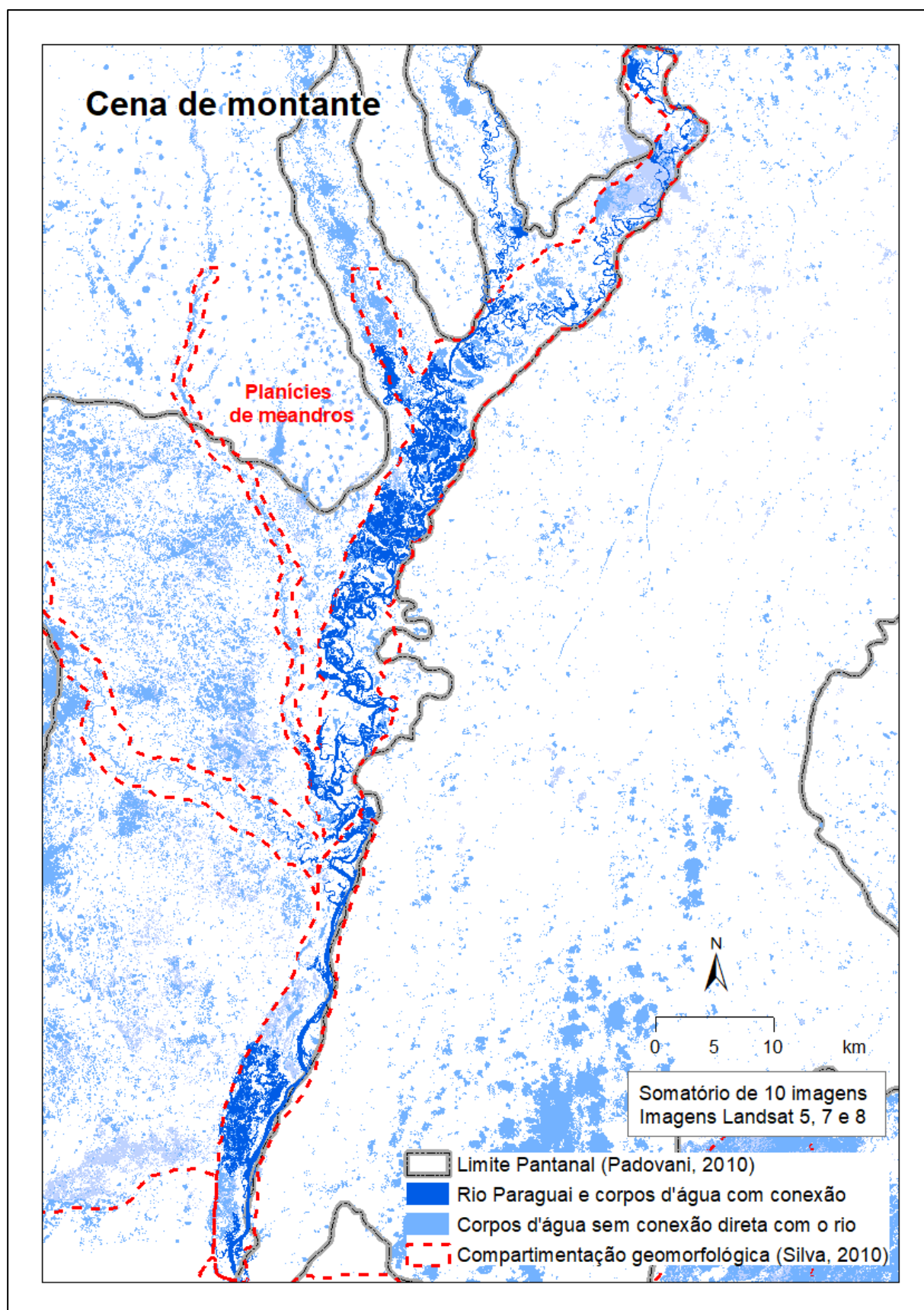


Figura 40. Resultado do MNDWI para a cena de montante do rio Paraguai.

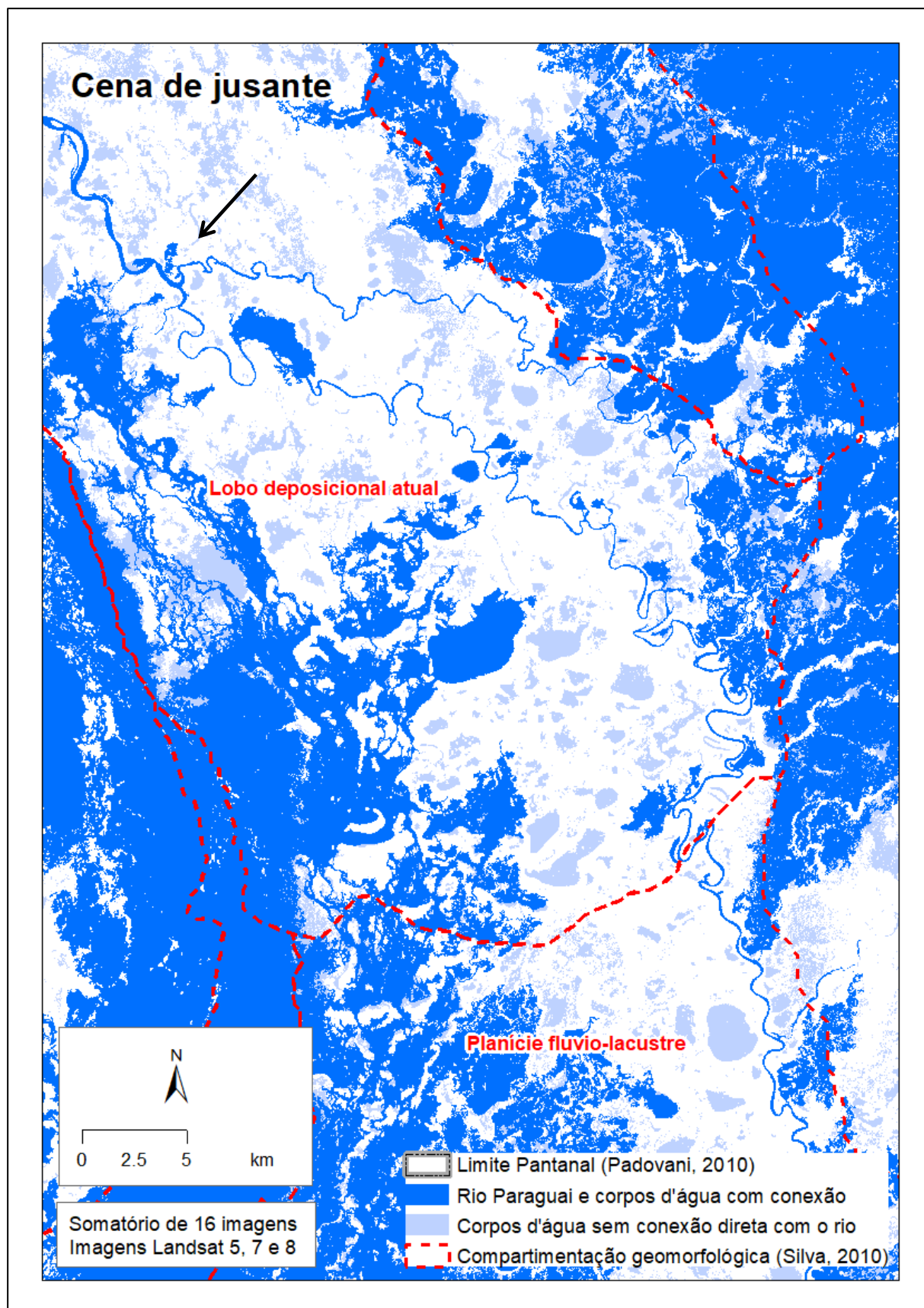


Figura 41. Resultado do MNDWI para a cena de jusante do rio Paraguai. A seta preta indica local onde o canal se bifurca, próximo à ilha de Taiaíma.

O modelo de mistura para a fração TSI do rio Paraguai apresentou comportamento diferente dos demais rios. A tonalidade dos pixels no rio Paraguai se apresenta mais clara, indicando uma presença menor de concentração de sedimentos inorgânicos. A partir do ponto em que ocorre avulsão do rio Paraguai, na ilha de Taiamã, ocorre uma mistura muito grande de água do rio com a da planície, não sendo possível identificar visualmente o comportamento das águas superficiais. As águas da inundação se espalham de forma divergente.

Nessa região e em direção a jusante, existem diversos paleocanais que são reativados em períodos de cheia e lagoas sazonalmente inundáveis. No modelo de mistura, alguns destes corpos d'água apresentam uma tonalidade vermelha que indicaria mais concentração de TSI que a do próprio rio. Entretanto, tal resposta pode ocorrer por conta da pouca profundidade destes corpos d'água, havendo uma resposta espectral significativa dos sedimentos de fundo, já depositados anteriormente; ou até mesmo revolvimento dos sedimentos de fundo pela ação eólica sobre estes corpos d'água mais rasos. Outra resposta pode ser o fato de o MNDWI ter mapeado algumas áreas de vegetação rasteira ou de solo com presença de água, o que pode fazer com que a própria resposta espectral da superfície abaixo apresente comportamento similar ao de um TSI.

A Figura 42 apresenta a fração TSI para a cena de jusante do Paraguai, na região onde o rio bifurca e se reencontra após a ilha Taiamã. Na figura, é possível observar a mistura de pixels de diversas cores e uma não-linearidade no comportamento das águas.

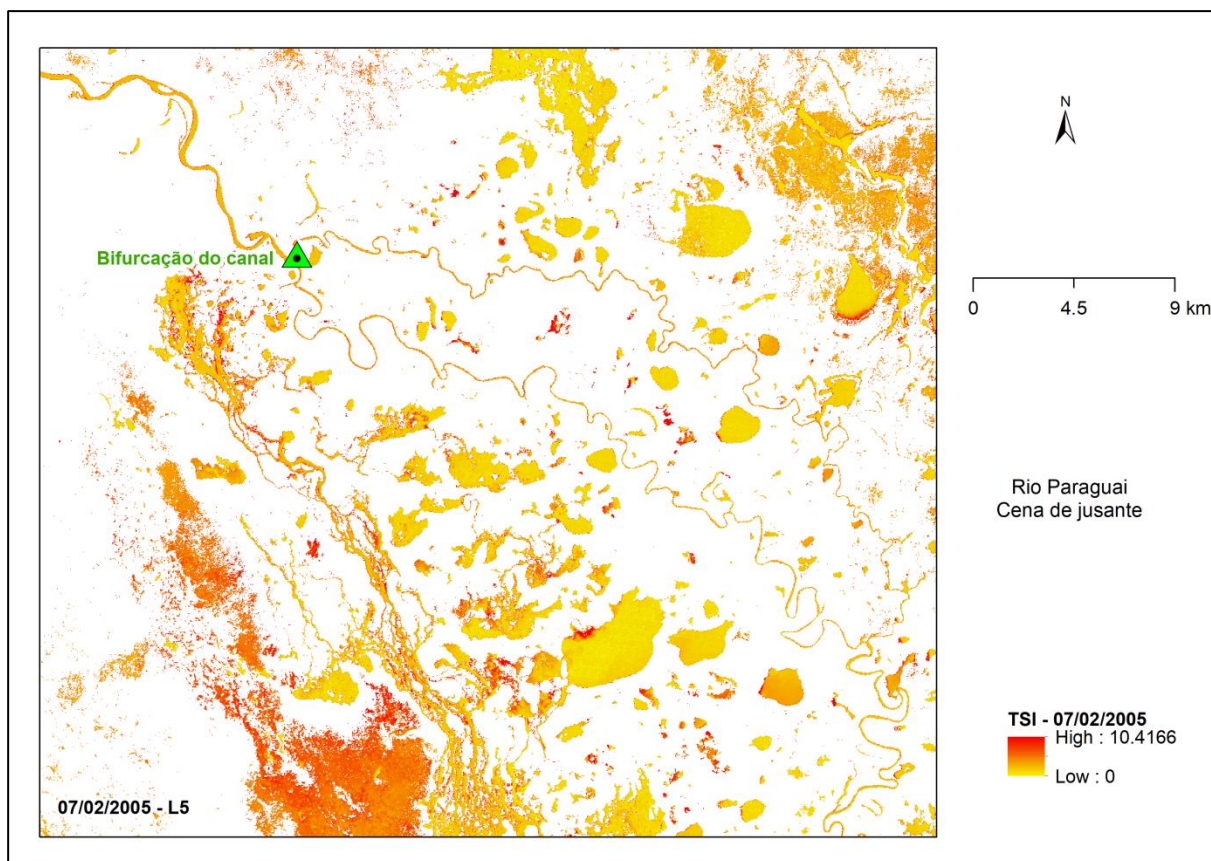


Figura 42. Fração TSI para a cena de jusante do rio Paraguai, para 07/02/2005.

6.5. Rio Piquiri / Itiquira

Os rios Itiquira, Correntes e Piquiri possuem suas nascentes no planalto do Taquari-Itiquira, fluindo de leste para oeste. Conforme já abordado no item 4.5, o esses rios são confluente e se tornam o Piquiri/Itiquira, desaguando no rio Cuiabá em sua margem esquerda. Formam um sistema interleques, limitado a norte pelo megaleque do rio São Lourenço, a sul pelo megaleque do Taquari e a oeste pelo megaleque do Cuiabá.

Os mapeamentos realizados pelo MNDWI corroboram as informações levantadas na literatura. Os rios Itiquira, Correntes e Piquiri, ao adentrar no Pantanal, se encontram confinado num cinturão de meandros, não havendo nestas áreas conexão direta das águas do rio com as inundações na planície. A Figura 43 apresenta o resultado do MNDWI para as cenas de montante.

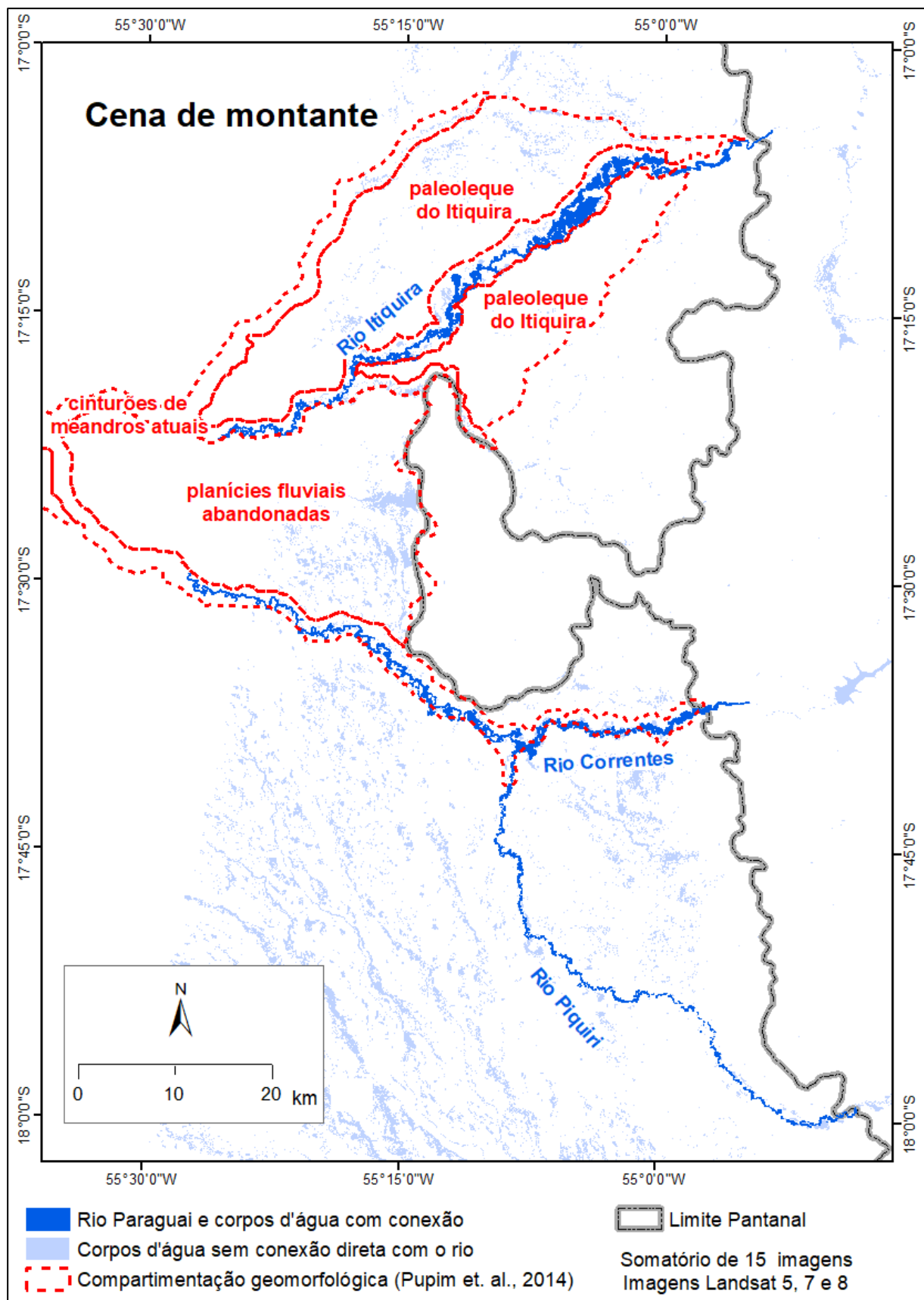


Figura 43. Resultado do MNDWI para a cena de montante do rio Piquiri-Itiquira.

O mapeamento da cena de montante também corresponde ao esperado, buscado na literatura, entretanto parece extrapolar ligeiramente os limites das compartimentações geomorfológicas bem no centro da Figura 44.

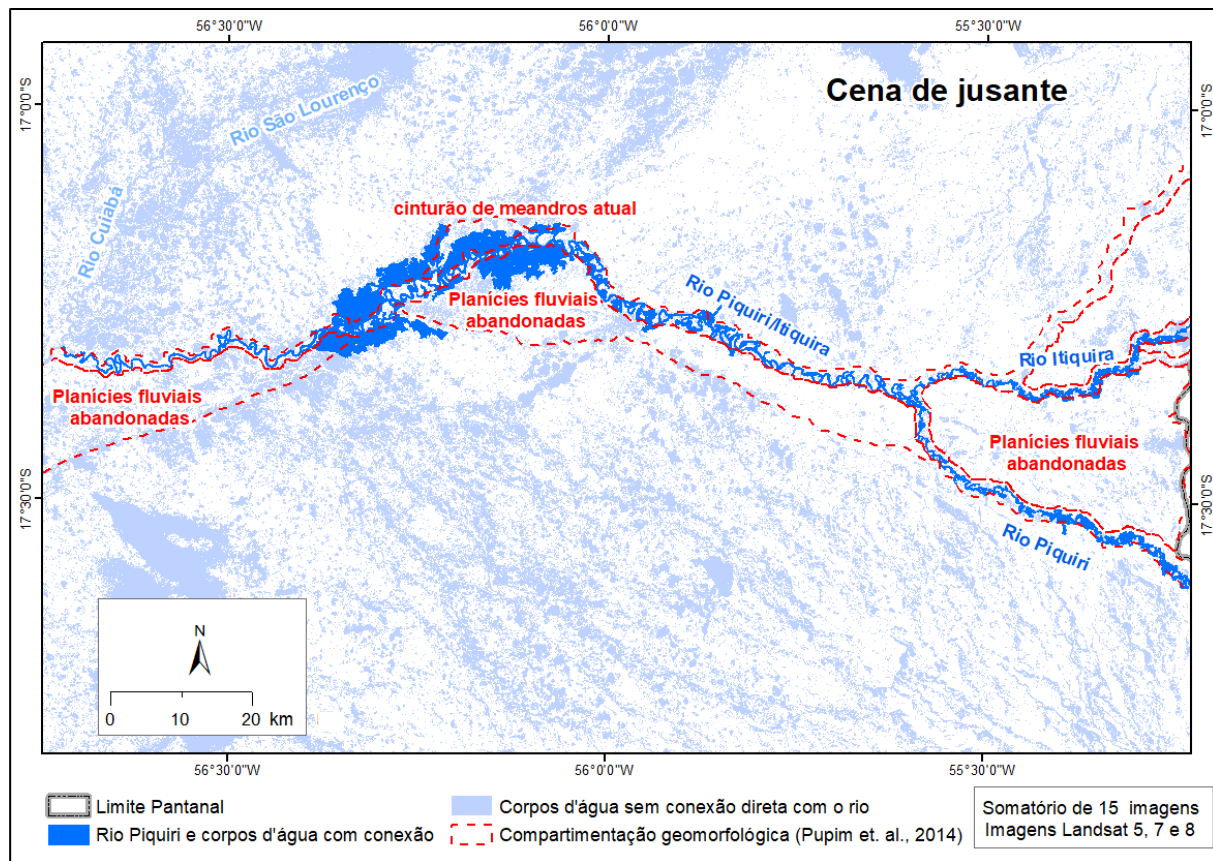


Figura 44. Resultado do MNDWI para a cena de jusante do rio Piquiri-Itiquira.

Dadas as características geomorfológicas descritas e o mapeamento realizado pelo MNDWI, observa-se que a contribuição dos rios Piquiri-Itiquira-Correntes para as inundações do Pantanal é pouco expressiva, se concentrando majoritariamente na faixa dos cinturões de meandros.

O modelo de mistura para a fração TSI do rio Piquiri apresentou os valores mais baixos analisados neste estudo. Os rios Piquiri, Itiquira e Correntes são mais estreitos do que os demais, em especial o rio Piquiri antes de sua confluência com o Correntes, e seu mapeamento através do MNDWI apresentou algumas limitações nos trechos e nas datas em que o rio se apresenta mais estreito. A adaptação do MNDWI para a banda do SWIR2 e o limiar de água/não água sendo 0,2 conseguiu

mapear com mais eficiência os trechos de canais mais estreitos, que o MNDWI utilizado a priori (com a banda SWIR1 e limiar de 0).

Além dos rios Piquiri, Correntes e Itiquira serem mais estreitos, apresentam coloração que indica uma carga de sedimentos orgânicos maior do que inorgânicos, com tonalidades pretas para a composição colorida falsa-cor, na qual, geralmente, os rios com sedimentos orgânicos apresentam tonalidade azul, como se observa no exemplo da Figura 45, comparando a imagem falsa-cor do rio Taquari e do rio Piquiri. É possível observar a tonalidade azul no rio Taquari que difere da tonalidade preta das demais águas nos paleocanais a norte e a sul do rio, enquanto que o rio Piquiri apresenta uma tonalidade bastante escura, próximo ao preto, similar à das águas presentes na planície.

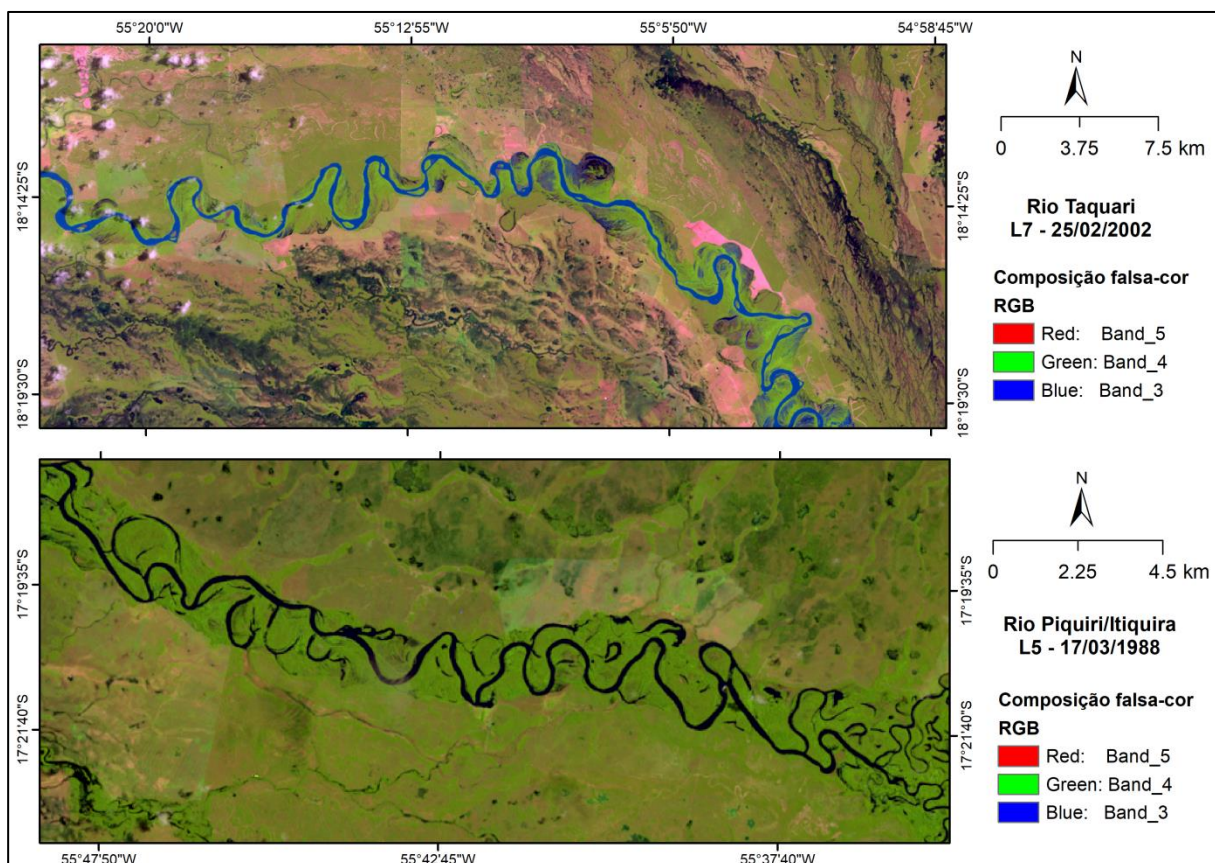


Figura 45. Comparação da composição falsa-cor para os rios Taquari, acima, e Piquiri, abaixo. Composição R(5) G(4) B(3).

Diante disto, o modelo de mistura apresentou, em diversas imagens, valores iguais a 0, e nas demais, valores baixos, tanto para a cena de montante quanto para jusante,

como se observa nas Figuras 46 e 47. Apenas algumas imagens apresentaram pixels com valor de maior concentração para TSI, como a cena mostrada na Figura 46, registrada em 18 de fevereiro de 1985.

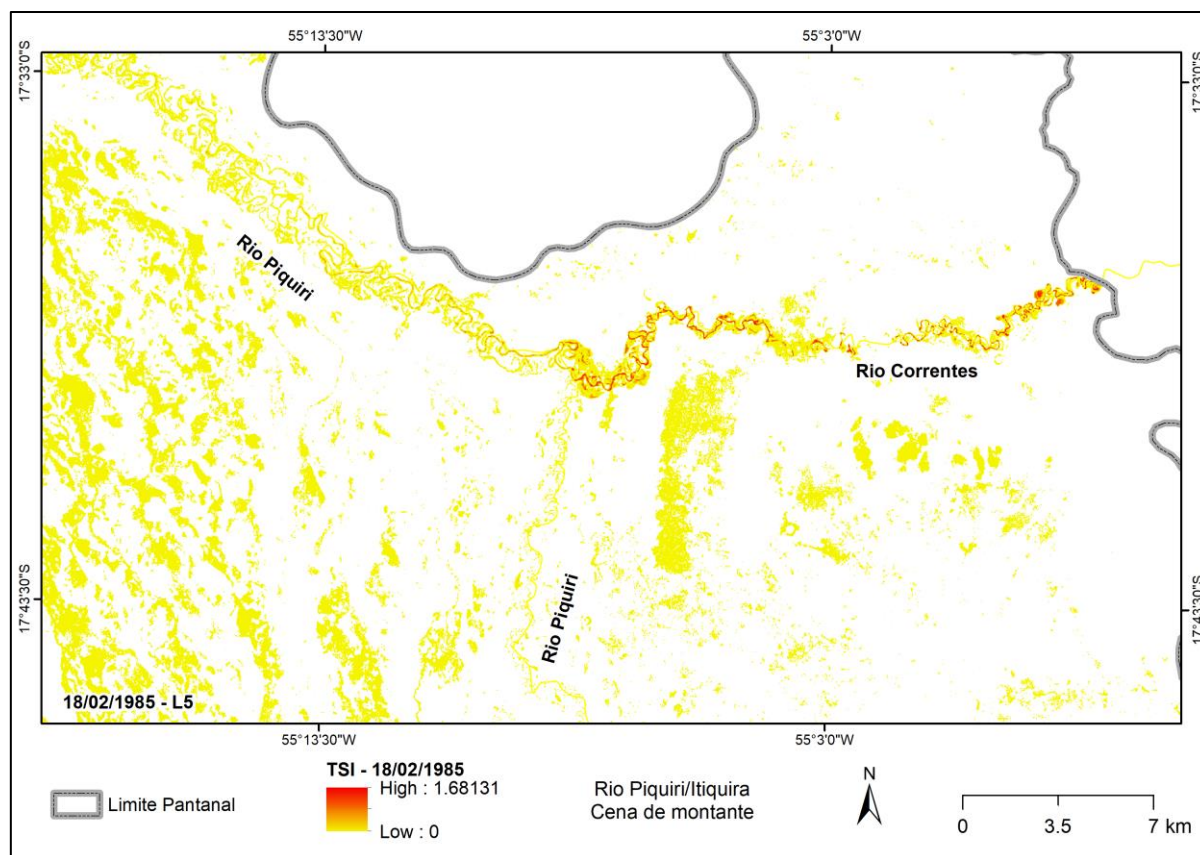


Figura 46. Fração TSI para a cena de montante do rio Piquiri-Itiquira, para 18/02/1985.

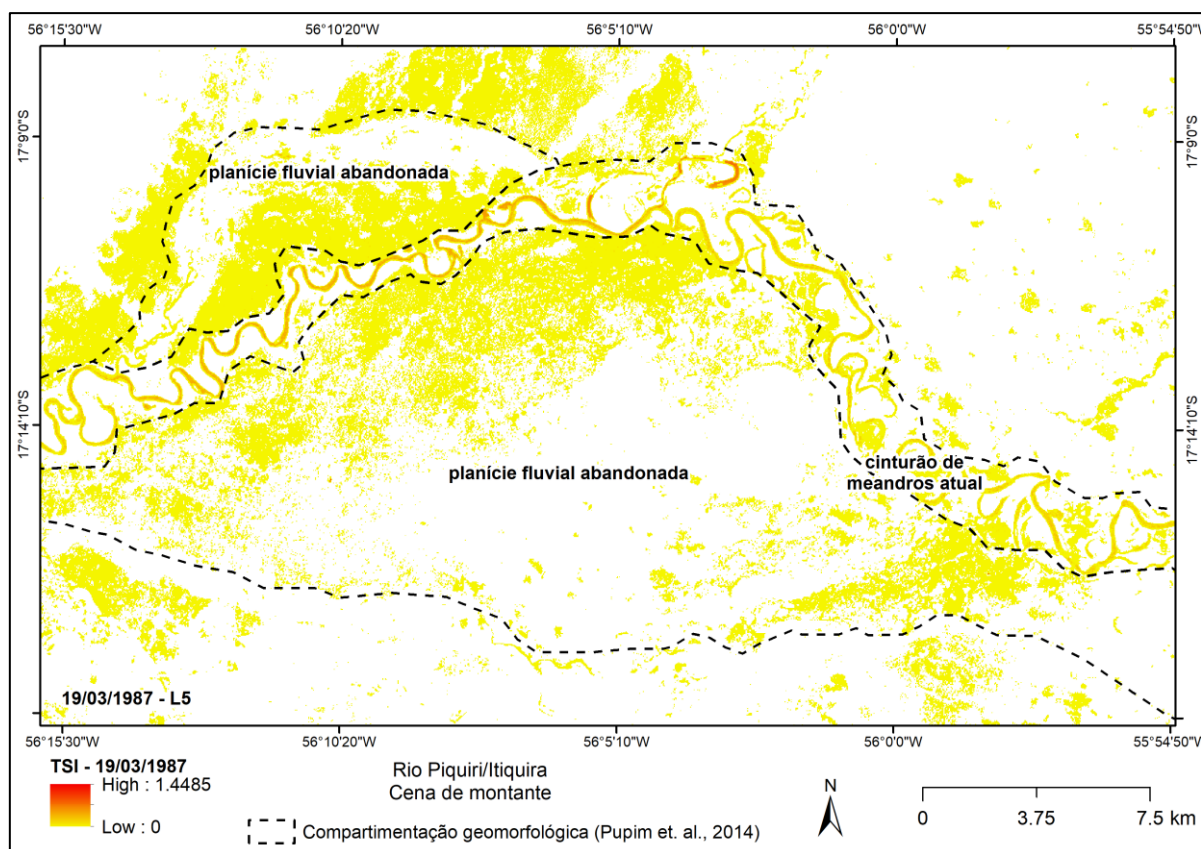


Figura 47. Fração TSI para a cena de jusante do rio Piquiri-Itiquira, para 19/03/1987.

5. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos pelo mapeamento através do MNDWI foram satisfatórios, considerando a dinâmica geomorfológica de cada local analisado. A utilização de pesquisas realizadas por outros autores auxiliou na compreensão da dinâmica das inundações locais do Pantanal. Puderam-se observar as semelhanças e as diferenças entre os megaleques do rio Taquari, São Lourenço, Cuiabá, Paraguai e o sistema interleques do Piquiri-Itiquira.

Os rios Paraguai, São Lourenço e Taquari possuem um funcionamento semelhante, de confinção do rio em um cinturão de meandros no primeiro trecho em que os rios percorrem no Pantanal, definindo a área de conectividade lateral entre o rio e a planície. As altitudes dos diques marginais dos rios vão diminuindo em direção a jusante, e a partir de determinado ponto, a mais de 100 km de distância da borda do Pantanal, o rio passa a correr em lobos distributários (ou deposicionais) que se encontram ainda ativos, em processo de sedimentação atual. Nesta área, são

comuns os processos de rompimento das margens do rio e perda de água do leito para a planície, bem como ocorrência de avulsão fluvial, quando o rio passa a correr em nova direção.

No caso do rio Cuiabá, a dinâmica de conectividade lateral difere um pouco dos primeiros dois apresentados, havendo conexão do rio com uma área maior de planície logo no primeiro trecho em que adentra ao Pantanal, como apresentado nas Figuras 27, 29 e 30. Esta conectividade, entretanto, não se caracteriza por uma perda de água do leito do rio para a planície, visto que os níveis de vazão medidos nas estações a montante e a jusante deste setor, não apresentam queda significativa. Entretanto, o modelo de mistura também evidencia a presença de sedimentos inorgânicos do rio nos trechos inundados da planície, indicando que nesta região existe troca de águas e sedimentos entre o rio e a planície, bem como na lagoa Chacororé. Para este caso do trecho inicial do rio Cuiabá, seriam necessárias investigações mais aprofundadas para compreender o relevo local e as conexões realizadas entre as águas do rio e da planície. De qualquer forma, a identificação de canais estreitos que fazem conexão do rio com estes corpos d'água se torna um caminho para circulação de peixes, conferindo a tais regiões importância quanto aos possíveis impactos a serem causados pela implantação das usinas hidrelétricas.

Para os rios Piquiri-Itiquira, que apresentam um sistema interleques, a presença do cinturão de meandros se estende até a sua foz, na confluência com o rio Cuiabá, caracterizando este sistema como pouco contributivo para as inundações das planícies adjacentes, em relação aos demais sistemas de megaleques.

A informação agregada pelos modelos de mistura permitem avaliar de maneira mais assertiva a presença da água dos rios na planície. As análises destes dados ficaram mais evidentes para os rios Taquari e São Lourenço, apresentando grande quantitativo de sedimentos inorgânicos (TSI) em suspensão no rio e podendo diferenciá-los facilmente das águas da planície, identificando também facilmente os locais onde os rios passam a perder água para planície, através dos pontos de arrombamento (principalmente). No caso do rio Cuiabá, a grande contribuição do modelo de mistura foi conseguir inferir melhor a conexão do rio com o trecho inicial

logo que entra no Pantanal, até a localização da baía Chacororé, a qual também se pôde observar um traçado indicando transporte dos sedimentos inorgânicos do rio para este corpo d'água.

Para o rio Paraguai, o modelo de mistura apresentou no TSI uma grande mistura de pixels da água do rio com a da planície. Isso ocorre pois a inundação, nessas áreas que são de baixa declividade, ocorre de maneira difusa, onde o rio Paraguai realiza grande conexão com vastas áreas inundadas, perdendo água e sedimentos para a planície que apresenta uma grande diversidade de paleocanais (que são, então, reativados nos períodos de cheia) e de lagoas sazonalmente inundadas.

Já para o rio Piquiri, os dados de modelo de mistura demonstraram o que já se havia observado nas imagens em composição colorida verdadeira e colorida falsa-cor, que os rios possam conter um quantitativo maior de sedimentos orgânicos do que inorgânicos.

Sugere-se a integração dos dados aqui analisados pelo modelo de mistura com os dados de sedimentos coletados em campo, que estão sendo realizados por outra equipe do projeto, a fim de complementar e confirmar as informações aqui geradas pela metodologia escolhida, que como qualquer outra metodologia a partir de sensoriamento remoto, possui suas limitações.

O presente relatório foi elaborado com o auxílio do Eng. Amb. Daniel Andrade Maciel, aluno de doutorado do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Especiais), que prestou assistência na geração e análise dos modelos de mistura espectrais.

Em 26 de Agosto de 2019

Andressa Padovani Gil

Geógrafa pela UFES

Mestranda em Geografia pela UNEMAT

REFERÊNCIAS

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

ALCÂNTARA, E. et al. Improving the spectral unmixing algorithm to map water turbidity Distributions. **Environmental Modelling and Software**, v. 24, n. 9, p. 1051–1061, 2009.

ASSINE, M. L. **Sedimentação na Bacia do Pantanal Mato-Grossense, Centro-Oeste do Brasil**. Rio Claro, Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Tese de Livre-Docência, 106p, 2003.

ASSINE, M. L. Taquari: um rio mutante. **Anais** do 2º Simpósio de Geotecnologias no Pantanal, Corumbá, 7-11 novembro 2009, Embrapa Informática Agropecuária/INPE, p.1034-1040.

ASSINE, M. L.; PADOVANI, C. R.; ZACHARIAS, A. A.; ÂNGULO, R. J.; SOUZA, M. C. Compartimentação geomorfológica, processos de avulsão fluvial e mudanças de curso do rio Taquari, Pantanal Mato Grossense. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, Ano 6, Nº 1, 2005.

BEZERRA, J. P. P. Conceitos centrais e os tensionamentos em torno da Lei 4.771 de 1965. In: **Periódico Eletrônico "Fórum Ambiental da Alta Paulista"**, v. 6, n. 2 (2010), p. 176-187. Disponível em: <http://www.amigosdanatureza.org.br/publicacoes/index.php/forum_ambiental/article/view/88>. Acesso em 06 mai 2018.

CALHEIROS, D. F.; OLIVEIRA, M. D. O rio Paraguai e sua planície de inundação - o Pantanal Mato-Grossense. **Ciência & Ambiente**, v. 41, 2010.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1980.

COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Aspectos da hidrologia da bacia do Alto rio Taquari. s/d. Disponível em <

https://www.researchgate.net/publication/228699847_ASPECTOS_DA_HIDROLOGIA_DA_BACIA_DO_ALTO_RIO_TAUQUARI>. Acesso em 10 out. 2018.

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

CORRADINI, F. A.; ASSINE, M. L. Compartimentação geomorfológica e processos deposicionais no megaleque fluvial do rio São Lourenço, Pantanal mato-grossense. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 42 (Supl 1), p. 20-33, 2012. Disponível em: <<http://www.ppegeo.igc.usp.br/index.php/rbg/article/view/7997/7421>>. Acesso em 10 de nov. 2018.

GEGE, P. WASI-2D: A software tool for regionally optimized analysis of imaging spectrometer data from deep and shallow waters. **Computers and Geosciences**, v. 62, p. 208–215, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2013.07.022>>.

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: **Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, 2019. 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 10 mai. 2019.

HAMILTON, S. K.; SIPPEL, S. J.; MELACK, J. M. Inundation Patterns in the Pantanal wetland of South America determined from passive microwave remote sensing. **Archiv fur Hydrobiologie**, Stuttgart, v. 137, p.1-23, jul. 1996.

KOBAYASHI, H. et al. Optical Properties of Inorganic Suspended Solids and Their Influence on Coastal Ocean Color Remote Sensing. International Archives of the Photogrammetry, **Remote Sensing and Spatial Information Science**, v. XXXVIII, n. 8, p. 997–1001, 2010.

MACIEL, D. A. et al. Retrieving Total and Inorganic suspended sediments in Amazon Floodplain Lakes: A multisensor approach. In prep., p. 1–36, 2019.

MARTINS, V. S. et al. Assessment of atmospheric correction methods for sentinel-2 MSI images applied to Amazon floodplain lakes. **Remote Sensing**, v. 9, n. 4, 2017.

MCFEETERS, S. K. Using the normalized difference water index (ndwi) within a geographic information system to detect swimming pools for mosquito abatement: A practical approach. **Remote Sensing**, v. 5, n. 7, p. 3544–3561, 2013.

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

MERTES, L. A. K.; SMITH, M. O.; ADAMS, J. B. Estimating suspended sediment concentrations in surface waters of the Amazon River wetlands from Landsat images. **Remote Sensing of Environment**, v. 43, n. 3, p. 281–301, 1993. Disponível em: <<http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-0027335306&partnerID=40&md5=cd066a6f3258281ee7d15f5dc3a212a9%5Cnhttp://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0034425793900715>>.

NOVO, E. M. L. DE M. et al. Seasonal changes in chlorophyll distributions in Amazon floodplain lakes derived from MODIS images. **Limnology**, v. 7, n. 3, p. 153–161, 2006.

NOVO, E. M.; SHIMABUKURO, Y. E. Spectral mixture analysis of inland tropical waters. **Remote Sensing**, v. 15, n. 6, p. 1351–1356, 1994.

NOVO, E. M. L. M. Ambientes Fluviais. In: FLORENZANO, T. G. (org). **Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.

PADOVANI, C. R. **Dinâmica espaço-temporal das inundações do Pantanal**. Tese (Doutorado em Ecologia Aplicada), Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”,

Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.

PADOVANI, C. R.; PONTARA, R. C. P.; PEREIRA, J. G. Mudanças recentes de leito no baixo curso do rio Taquari, no Pantanal Mato grossense. **Boletim Paranaense de Geociências**, n. 49, p. 33 38, 2001. Editora da UFPR.

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

PUPIM, F. N.; ASSINE, M. L.; MERINO, E. R.; MACEDO, H. A.; SILVA, A. A planície interleques do rio Piquiri, bacia do Pantanal. In: V Simpósio de Geotecnologias no Pantanal. **Anais...** Campo Grande, p. 848-857, 2014.

ROBERTS, D. A. et al. Mapping Chaparral in the Santa Monica Mountains Using Multiple Endmember Spectral Mixture Models. v. 4257, n. 98, 1998.

RUDORFF, C. M.; NOVO, E. M. L. M.; GALVÃO, L. S. Spectral Mixture Analysis of Inland Tropical Amazon Floodplain Waters Using EO-1 Hyperion. p. 128–133, 2006.

SHIMABUKURO, Y. E.; PONZONI, F. J. Spectral Mixture for Remote Sensing. [S.l: s.n.], 2019. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/978-3-030-02017-0>>.

SILVA, A. **Geomorfologia do megaleque do rio Paraguai, Quaternário do pantanal mato-grossense, Centro-oeste do brasil**. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente). Unesp Rio Claro, 2010.

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

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

ZANI, H.; ASSINE, M. L.; ARAÚJO, B. C.; MERINO, E. R.; SILVA, A.; FANCICANI, E. M. Lobos deposicionais na evolução do megaleque do rio Taquari, Pantanal Mato-grossense. **Anais** do 1º Simpósio de Geotecnologias no Pantanal, Campo Grande, Brasil, 11-15 novembro 2006, Embrapa Informática Agropecuária/INPE, p.285-292.