

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS E ESCOLA DE ENGENHARIA
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

PRISCILA HIROMI YAMAZAKI

FERRAMENTAS PARA AVALIAÇÃO DA DINÂMICA ESPAÇO-TEMPORAL DA
MORFOLOGIA FLUVIAL ATRAVÉS DE SENSORIAMENTO REMOTO

Porto Alegre
Dezembro de 2017

PRISCILA HIROMI YAMAZAKI

FERRAMENTAS PARA AVALIAÇÃO DA DINÂMICA ESPAÇO-TEMPORAL DA
MORFOLOGIA FLUVIAL ATRAVÉS DE SENSORIAMENTO REMOTO

TRABALHO DE CONCLUSÃO
APRESENTADO AO CURSO DE
ENGENHARIA AMBIENTAL DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO
GRANDE DO SUL COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO
TÍTULO DE ENGENHEIRA AMBIENTAL.

Orientador: Prof. Me. Alfonso Risso

Coorientador: Prof. Dr. Fernando
Mainardi Fan

Porto Alegre

Dezembro de 2017

PRISCILA HIROMI YAMAZAZKI

FERRAMENTAS PARA AVALIAÇÃO DA DINÂMICA ESPAÇO-TEMPORAL DA
MORFOLOGIA FLUVIAL ATRAVÉS DO SENSORIAMENTO REMOTO

Trabalho de Conclusão apresentado ao curso de Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como parte dos requisitos para a obtenção do título de Engenheira Ambiental.

Aprovado em: Porto Alegre, 19 de dezembro de 2017.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Fernando Mainardi Fan - Coorientador
UFRGS

Prof. Dr. Alexandre Beluco
UFRGS

Me. Maurício Andrades Paixão
UFRGS

RESUMO

Os rios são elementos fundamentais dos ciclos hidrológico e biogeoquímico, *hotspots* de biodiversidade e suportam o desenvolvimento da sociedade humana. Contudo, sistemas fluviais são dinâmicos e alterações na morfologia dos rios podem, potencialmente, gerar impactos econômicos, sociais e ambientais importantes. A compreensão da dinâmica morfológica dos rios é, portanto, um ponto crítico na resolução de problemas geomorfológicos, de gestão e em estudos de processos ecológicos. Neste contexto, o sensoriamento remoto e os sistemas de informação geográfica surgem como instrumentos importantes no subsídio de estudos sobre o comportamento dos rios. Este estudo descreve o uso destes instrumentos na reconstrução da migração lateral dos canais principais de três rios brasileiros: Camaquã, Purus e Taquari. Imagens para cada ano entre 1984 e 2017 foram obtidas da *Landsat Collection*, processadas e sobrepostas, permitindo a visualização da migração dos canais principais ao longo do tempo. Para o rio Purus, a reconstrução da migração lateral também foi realizada utilizando a linha central do canal fluvial de cada ano.

Palavras-chave: Dinâmica fluvial, Landsat, Sensoriamento remoto.

ABSTRACT

Rivers are fundamental components of the hydrologic and biogeochemical cycles, biodiversity hotspots and support to the development of human society. However, fluvial systems are dynamic and changes in river morphology can potentially bring about important economic, social and environmental impacts. Understanding morphologic dynamics of rivers is therefore a critical point in the solution of geomorphological and management problems, as well as in ecological studies. In this context, remote sensing and geographic information systems emerge as important instruments, supporting studies of river behaviour. This study describes the use of such instruments in the reconstruction of lateral migration of the main channel of three Brazilian rivers: Camaquã, Purus e Taquari. The images for each year between 1984 and 2017 were obtained from the Landsat Collection, then processed and overlaid, allowing the visualization of main channel migration through time. For the Purus river, the reconstruction of lateral migration was also achieved by using the central line of the fluvial channel from each year.

Keywords: Fluvial dynamics, Landsat, Remote sensing

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização dos rios (1) Purus, (2) Taquari e (3) Camaquã.....	14
Figura 2 - Ponto selecionado no rio Camaquã, através do Google Earth.....	18
Figura 3 - Ponto selecionado no rio Purus, através do Google Earth.....	19
Figura 4 - Ponto selecionado no rio Taquari, através do Google Earth.	19
Figura 5 - Esquema da obtenção da imagem binária: (1) Imagem Landsat; (2) Recorte da área de estudo; (3) Banda do verde e (4) Banda do NIR são utilizadas para o cálculo do (5) NDWI, que é reclassificado resultando na (6) Imagem binária.	23
Figura 6 - Esquema da sobreposição de imagens: (1) Imagens binárias do NDWI são somadas; o (2) Resultado da soma é reclassificado resultando em uma (3) Imagem binária da soma, cuja multiplicação pelas Imagens binárias do NDWI, resulta em (4) Imagens binárias com reduzida influência de eventos sazonais ou extremos; atribuindo um valor diferente a cada uma destas e sobrepondo-as, o resultado é uma (5) Representação da migração do canal fluvial.	25
Figura 7 - Esquema da sobreposição dos vetores das linhas centrais: a (1) Imagem binária foi convertida em (2) Imagem vetorizada; as linhas do canal fluvial do rio foram selecionadas gerando uma (3) Imagem do contorno do canal fluvial, a partir da qual se determinou a (4) Linha central do canal fluvial; as linhas centrais dos canais fluviais de cada ano foram sobrepostas.	26
Figura 8 - Gráfico das vazões médias mensais do rio Camaquã. A área verde marca os meses do ano a partir dos quais as imagens Landsat foram selecionadas.....	28
Figura 9 - Gráfico das vazões médias mensais do rio Purus. A área verde marca os meses do ano a partir dos quais as imagens Landsat foram selecionadas.	29
Figura 10 - Gráfico das vazões médias mensais do rio Taquari. A área verde marca os meses do ano a partir dos quais as imagens Landsat foram selecionadas.....	29
Figura 11 - Vazão específica ($L.s^{-1}.km^{-2}$) dos rios Camaquã, Purus e Taquari.	30
Figura 12 - Sobreposição das 34 imagens binárias do rio Camaquã, Rio Grande do Sul, obtidas através do NDWI.	31
Figura 13 - Soma das imagens binárias do rio Camaquã, Rio Grande do Sul, de 1984 a 2017, obtidas através do NDWI. Em destaque um trecho onde ocorreram migrações laterais, mas a visualização é dificultada pela presença de áreas inundadas.....	32
Figura 14 - Resultado da multiplicação da imagem binária da soma pela sobreposição das imagens do rio Camaquã, Rio Grande do Sul.	33

Figura 15 - Sobreposição das imagens binárias do rio Purus, Amazonas, de 1984 a 2017. Em destaque, o abandono de um meandro ocorrido durante o período.	34
Figura 16 - Sobreposição da linha central rio Purus, Amazonas, de 1984 a 2017. Em destaque o movimento que tende ao "estrangulamento" do meandro localizado a jusante do trecho estudado e o abandono gradual de um meandro localizado a montante do trecho estudado.	35
Figura 17 - Sobreposição de imagens binárias do rio Taquari, Mato Grosso do sul, de 1984 a 2017. Em destaque, o movimento dos meandros.	36
Figura 18 - Modelo digital de elevação da zona de 10 quilômetros ao redor do trecho do rio Camaquã, Rio Grande do Sul.	37
Figura 19 - Modelo digital de elevação da zona de 10 quilômetros ao redor do trecho do rio Purus, Amazonas.	38
Figura 20 - Modelo digital de elevação da zona de 10 quilômetros ao redor do trecho do rio Taquari, Mato Grosso do Sul.	38
Figura 21 - Declividade percentual da zona de 10 quilômetros ao redor de trecho do rio Camaquã, Rio Grande do Sul.	39
Figura 22 - Declividade percentual da zona de 10 quilômetros ao redor de trecho do rio Purus, Amazonas.	39
Figura 23 - Declividade percentual da zona de 10 quilômetros ao redor de trecho do rio Taquari, Mato Grosso do Sul.	40
Figura 24 - Tipos de solos na zona do trecho do rio Camaquã, Rio Grande do Sul.	40
Figura 25 - Tipos de solos na zona do trecho do rio Purus, Amazonas.	41
Figura 26 - Tipos de solos na zona do trecho do rio Taquari, Mato Grosso do Sul.	41

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
3	OBJETIVO.....	13
3.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
4	CARACTERIZAÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO	14
4.1	RIO CAMAQUÃ.....	14
4.2	RIO PURUS	15
4.3	RIO TAQUARI.....	16
5	METODOLOGIA.....	18
5.1	IMAGENS LANDSAT	21
5.2	PROCESSAMENTO DAS IMAGENS.....	21
5.2.1	Cálculo do Índice da Diferença Normalizada da Água (NDWI).....	22
5.2.2	Reconstrução da migração lateral dos canais fluviais	23
5.3	DADOS ADICIONAIS.....	26
6	RESULTADOS	28
6.1	RIO CAMAQUÃ.....	30
6.2	RIO PURUS	33
6.3	RIO TAQUARI.....	35
6.4	DADOS ADICIONAIS.....	36
7	DISCUSSÃO	43
8	CONCLUSÃO.....	47
	REFERÊNCIAS.....	48

1 INTRODUÇÃO

Os rios possuem importância fundamental para os ciclos hidrológico e biogeoquímico, são *hotspots* de biodiversidade, vias de transporte e fontes de água para o consumo, geração de energia e lazer humanos. Entretanto, sistemas fluviais estão sujeitos a constantes modificações de suas características físicas, especialmente da sua geometria. Reações a essas instabilidades dos sistemas fluviais têm o potencial de se propagar por grandes distâncias e de gerar impactos econômicos, sociais e ambientais (CARDOSO, 1998). Mudanças na conectividade de ambientes aquáticos, por exemplo, influenciam os ecossistemas associados e suas funções (ALLEN & PAVELSKY, 2015).

A crescente influência da ação humana sobre a dinâmica multitemporal da morfologia dos rios vem gerando um aumento no número de estudos sobre o tema desde o fim do século XX (RHOADS *et al.*, 2016; KISS & BLANKA, 2012). Rhoads *et al.* (2016) classificam os efeitos antropogênicos sobre os rios como diretos, como aqueles resultantes da construção de barragens, canalizações e da retirada de água para irrigação, uso industrial ou urbano, ou indiretos, como aqueles relacionados às mudanças climáticas e às mudanças no uso e cobertura do solo. O entendimento do comportamento dos rios, frente a estas alterações, fornece subsídios para o desenvolvimento de medidas de redução ou mitigação de danos causados por mudanças em sua morfologia. Portanto, a compreensão da dinâmica morfológica dos rios é um ponto crítico na resolução de problemas geomorfológicos, de gestão e em estudos de processos ecológicos (KISS & BLANKA, 2012; GÜNERALP *et al.*, 2012).

O sensoriamento remoto e os sistemas de informação geográfica despontam como uma ferramenta importante para o planejamento e gestão de ambientes fluviais. Eles proporcionam a oportunidade de mapear mudanças nos cursos dos rios em áreas de grandes extensões, com alta resolução temporal (SCHWENK *et al.*, 2017). Um exemplo de seu emprego é o programa de acesso a informações sobre risco de inundações, estabelecido pelo governo australiano após as inundações que afetaram a costa leste do país em 2011. Este sistema utilizou os dados obtidos pelos satélites Landsat na geração de dados históricos de inundações em rios de todo o continente (MUELLER *et al.*, 2016).

Rios que atravessam planícies aluvionares em zigue-zague, chamados meandrantos, frequentemente apresentam deslocamentos dos meandros para

jusante (CARDOSO, 1998). A migração lateral é a mudança posicional do canal fluvial em resposta a variações no fluxo de água e sedimentos (YANG *et al.*, 1999). Os processos que governam a dinâmica dos rios meandantes resultam da interação entre escoamento turbulento, transporte de sedimentos, erosão dos taludes e morfologia planar (GÜNERALP *et al.*, 2012). Portanto, a resistência à erosão em ambientes aluvionares é um fator externo importante que afeta a dinâmica dos meandros, e é influenciada pela vegetação ripária, sedimentologia dos depósitos fluviais e estrutura geológica da planície de inundação (GÜNERALP *et al.*, 2012).

Este estudo propõe a reconstrução da migração lateral de três rios brasileiros ao longo de um período de 34 anos, utilizando imagens de satélite e ferramentas de sensoriamento remoto e sistemas de informação geográfica. Os resultados obtidos podem subsidiar trabalhos de modelagem fluvial, reconstrução de séries hidrológicas, estudos de impacto ambiental e auxiliar a gestão territorial na área das bacias.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Desde o lançamento do Landsat 5 em 01 de março de 1984, satélites têm captado imagens do mundo todo com resolução de 30 metros a cada 16 dias (SCHWENK *et al.*, 2017). Por esta razão, o uso de imagens de satélite tem sido cada vez mais frequente em estudos da dinâmica morfológica dos rios.

Tecnologias de geoprocessamento e imagens Landsat foram utilizadas por Yang *et al.* (1999) no estudo da migração do rio Amarelo em sua planície deltaica, na China, de 1976 a 1994. Diferentes combinações de bandas espectrais foram testadas para melhor definir o contorno do rio, diferenciando a água da vegetação, e as mudanças espaço-temporais das margens e da linha central do rio foram examinadas. Posteriormente, os autores relacionaram as mudanças observadas a processos naturais e antrópicos ocorridos na área.

Petsch *et al.* (2012) realizaram um estudo comparativo das migrações do rio Antas, no Brasil, entre 1984 e 2011. Imagens Landsat foram utilizadas para a identificação e medição dos eixos dos meandros e dos raios de curvatura. Uma tendência de retilinização do canal foi observada em alguns pontos, assim como expansão de curvas meândricas e abandono de canal.

O rio Jamuna, em Bangladesh, está sob o efeito de processos erosivos que alteram significativamente seu curso e, como consequência, deixam milhares de famílias desabrigadas a cada ano. Baki e Gan (2012) estudaram o rio Jamuna entre 1973 e 2003, utilizando imagens Landsat, com o objetivo de entender o comportamento do rio e assim subsidiar medidas mitigatórias e de prevenção de danos à infraestrutura pública local. Imagens da época de estiagem para cada ano foram classificadas em três classes de cobertura e as mudanças das margens foram medidas através do estabelecimento de seções transversais em diversos pontos do rio e da comparação de imagens de anos consecutivos. Desta forma, mudanças de curto prazo e de longo prazo foram identificadas, assim como mudanças nas ilhas presentes no curso do rio.

Imagens Landsat também foram utilizadas por Gupta *et al.* (2013), que reconstruíram mudanças da forma planar ocorridas no rio Ganga de 1972 a 2010, na fronteira entre Índia e Bangladesh. O delineamento das margens foi realizado manualmente e imagens de anos consecutivos foram comparadas. Um padrão de

mudanças periódico foi identificado, como um pulso cíclico, tendo implicações importantes na gestão da área.

Hossain *et al.* (2013) estudaram mudanças morfológicas no rio Ganges, em Bangladesh, entre 1973 e 2009, utilizando imagens de satélite. Taxas de movimento das margens e de erosão e deposição de sedimentos foram analisadas utilizando técnicas de geoprocessamento. As margens do rio foram delineadas manualmente e as mudanças nelas ocorridas foram estimadas através do estabelecimento de seções transversais em diversos pontos do rio. A erosão das margens, relacionada com o aumento da sinuosidade do rio, foi atribuída à susceptibilidade do material das margens e à alta vazão, especialmente durante o período de monções.

Maurya e Yadav (2016) estudaram mudanças no curso do rio Ramganga, na Índia, entre 1972 e 2013, utilizando o sensoriamento remoto e sistemas de informação geográfica. Inundações e mudanças de curso impediam o desenvolvimento da área estudada devido aos danos causados à infraestrutura, e o estudo visava fornecer subsídios para uma melhor gestão territorial. O índice da diferença normalizada da água foi utilizado para delimitar o rio a partir das imagens de satélite e as linhas das margens delimitadas foram sobrepostas e analisadas.

Mais recentemente, Schwenk *et al.* (2017) utilizaram imagens Landsat para quantificar as mudanças na forma planar do rio Ucayali, no Peru, de 1985 a 2015. Máscaras derivadas de imagens de satélite foram analisadas utilizando a ferramenta RivMAP (*River Morphodynamics from Analysis of Planforms*), desenvolvida para o software MATLAB, que permite medir mudanças na largura e localização do rio e taxas de migração, deposição de sedimentos e erosão.

3 OBJETIVO

Utilizar imagens de satélite e ferramentas de sistemas de informação geográfica na reconstrução da dinâmica espaço-temporal do canal principal de trechos dos rios Camaquã, Purus e Taquari, ocorridas entre 1984 e 2017.

3.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

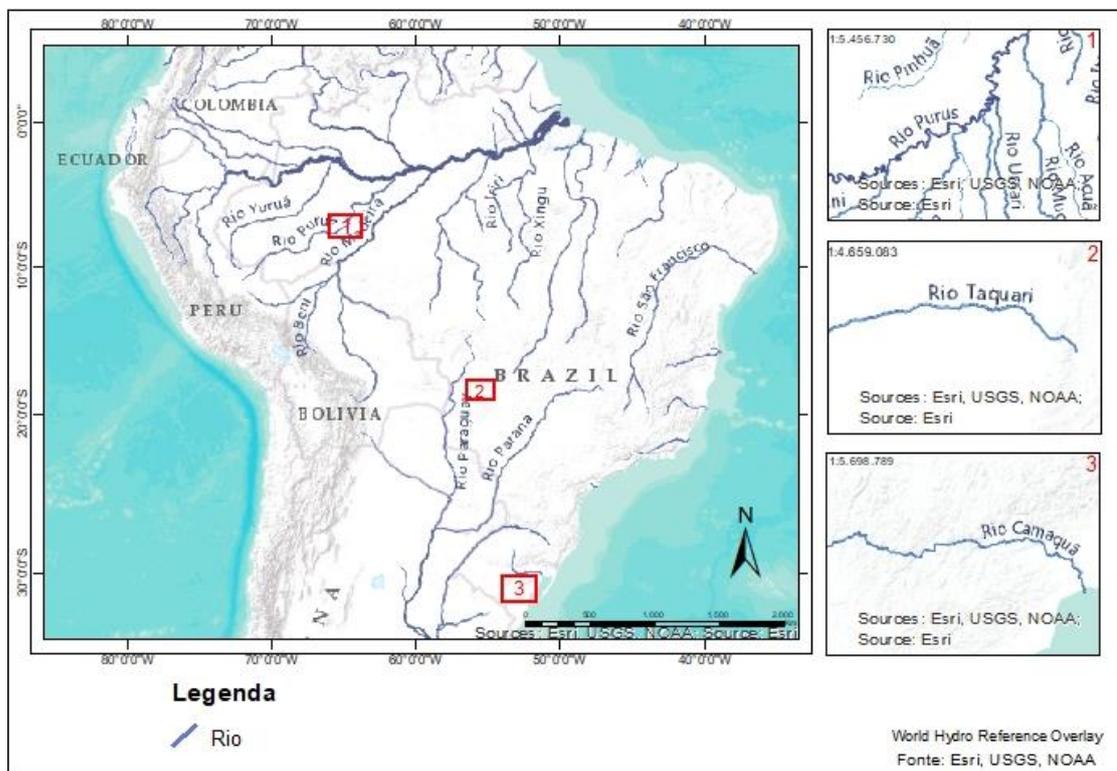
Os objetivos específicos deste estudo são:

- a) demonstrar a possibilidade de uso de imagens de satélite na investigação da migração de canais fluviais;
- b) verificar a viabilidade do uso do índice da diferença normalizada da água (NDWI) para a delimitação dos rios;
- c) reconstruir a migração lateral dos canais fluviais, ocorrida no período analisado, utilizando dados *raster*;
- d) reconstruir a migração lateral do canal fluvial do rio Purus, ocorrida no período analisado, utilizando dados vetoriais de sua linha central;
- e) identificar as limitações das metodologias utilizadas.

4 CARACTERIZAÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO

Três rios brasileiros foram selecionados para o presente estudo: Camaquã, localizado no Rio Grande do Sul; Purus, localizado nos estados do Acre e Amazonas; e Taquari, localizado no Mato Grosso do Sul (Figura 1). Todos possuem trechos meandранtes com evidências de migrações laterais, como meandros abandonados. Entretanto, cada um pertence a uma região diferente do país e suas bacias hidrográficas apresentam características próprias quanto à geomorfologia, clima e uso e ocupação do solo.

Figura 1 - Localização dos rios (1) Purus, (2) Taquari e (3) Camaquã.



4.1 RIO CAMAQUÃ

O Rio Camaquã localiza-se na porção central do Rio Grande do Sul, estendendo-se por cerca de 430 quilômetros e desembocando na Laguna dos Patos. Suas nascentes localizam-se nos municípios de Dom Pedrito e Lavras do Sul. A bacia hidrográfica do rio Camaquã pertence à Região Hidrográfica das Bacias Litorâneas e abrange uma área de cerca de 21.657km² (CGBHRC s.d.).

A bacia hidrográfica do rio Camaquã apresenta boa disponibilidade hídrica e distribuição uniforme das chuvas durante o ano, sem estação seca bem definida. Está localizada sobre o Planalto Sul-Riograndense e a Planície Costeira Gaúcha. Cerca de 60% das terras da bacia são aptas para a agricultura irrigada, sendo o cultivo de lavouras temporárias e a pecuária as principais atividades desenvolvidas. Entre os efeitos antrópicos evidenciados ao longo do rio estão o assoreamento e a erosão de barrancas, causados pelo desmonte hidráulico de sedimentos e mineração (GAMA, 2016).

A área de estudo se restringe à região do Baixo Camaquã, sobre a Planície Costeira Gaúcha, onde existem canais e meandros abandonados, margeados por banhados e grandes áreas inundáveis.

4.2 RIO PURUS

O rio Purus nasce no Peru e estende-se por cerca de 3218 quilômetros até sua foz, no rio Solimões, do qual é um dos maiores tributários. Atravessa, no território brasileiro, os estados do Acre e Amazonas. Sua bacia cobre também áreas do Peru e da Bolívia. No estado do Acre, seu curso apresenta-se intensamente curvilíneo, deixando diversos meandros abandonados (INPE s.d.; SOUSA JÚNIOR *et al.*, 2006; SILVA *et al.*, 2008).

A bacia do rio Purus localiza-se na porção sudeste da Amazônia e é ainda pouco antropizada, apresentando ambientes naturais conservados e grande número de habitats com graus de conectividade definidos a partir dos movimentos do rio (SOUSA JÚNIOR *et al.*, 2006). Em função da dinâmica socioambiental e da morfologia fluvial, a bacia é dividida em três trechos: o alto Purus, porção acreana da bacia, o médio Purus, porção sul da bacia no estado do Amazonas e o baixo Purus, na parte mais próxima a foz (INPE s.d.). A área da bacia apresenta evidente ciclo anual marcado por estação chuvosa, entre os meses de novembro e março, e estação seca, entre maio e setembro (SILVA *et al.*, 2008).

O impacto da ocupação antrópica na bacia está associado principalmente às atividades madeireira e agropecuária, na região de interface entre a porção leste do estado do Acre e a divisa com o Amazonas. Essa área representa a expansão de fronteira agrícola, facilitada pelas rodovias BR-364, BR-319 e BR-230 (INPE s.d.).

A área de estudo restringe-se a um trecho do médio Purus, localizado no estado do Amazonas.

4.3 RIO TAQUARI

O rio Taquari é um afluente da margem esquerda do rio Paraguai e um dos principais formadores do Pantanal Mato-Grossense. É um rio de alta energia, assim como seu principal afluente, o rio Coxim, e seu padrão de drenagem se ajusta a fraturas no planalto, abrindo-se em um leque aluvial na planície do Pantanal. Uma abrupta escarpa marca o limite entre o planalto e o Pantanal (ASSINE *et al.*, 2005).

O leque aluvial do rio Taquari vem sendo construído desde o Pleistoceno e apresenta geometria aproximadamente circular, com diâmetro de cerca de 250 quilômetros. Na sua porção superior, o rio Taquari encontra-se confinado em um cinturão de meandros, percorrendo cerca de 100 quilômetros em um vale limitado por terraços marginais. A altura dos terraços diminui para jusante e o rio entra no seu lobo distributário atual, onde passa a apresentar baixa sinuosidade e um padrão anastomosado (ASSINE *et al.*, 2005).

As mudanças no curso do rio Taquari na porção superior do leque aluvial restringem-se à migração lateral e ao abandono de meandros (*cutoffs*), e não há perda significativa de água durante as cheias, pois o rompimento dos diques marginais ocorre dentro do cinturão de meandros (ASSINE *et al.*, 2005).

A marcada sazonalidade das precipitações e a grande capacidade de regularização natural são características hidrológicas marcantes da bacia hidrográfica do rio Taquari. Os solos arenosos profundos e as rochas de arenito, presentes em quase 50%, da bacia favorecem o armazenamento de água subterrânea e contribuem para a regularização da vazão (COLLISCHONN & TUCCI, s.d).

Originalmente coberta por florestas e cerrado, a bacia hidrográfica do rio Taquari vem sofrendo alterações antrópicas desde a década de 70, e é hoje majoritariamente utilizada para a agricultura e pecuária (COLLISCHONN & TUCCI, s.d.). Outrora importante hidrovia, o rio Taquari é hoje pouco profundo, sofrendo com frequentes processos de avulsão fluvial, que causam mudanças no seu curso e inundações de áreas antes raramente inundáveis. A mudança do uso e ocupação do solo nos últimos 25 anos tem acelerado processos erosivos, principalmente nas cabeceiras do rio (ASSINE *et al.*, 2005).

A área de estudo restringe-se ao trecho do rio Taquari confinado no cinturão de meandros, na porção superior do leque aluvial.

5 METODOLOGIA

Para identificar trechos dos rios Camaquã, Purus e Taquari adequados ao estudo, utilizou-se a ferramenta Imagens Históricas do Google Earth. Por se tratar de uma avaliação da dinâmica morfológica, foram escolhidos trechos meandrantos destes rios que percorrem planícies e apresentam evidências de migrações laterais, como o abandono de meandros. Pontos sobre os rios Camaquã, Purus e Taquari foram marcados (Figuras 2, 3 e 4) e suas coordenadas foram utilizadas como critério de busca dos dados de sensoriamento remoto.

Figura 2 - Ponto selecionado no rio Camaquã, através do Google Earth.

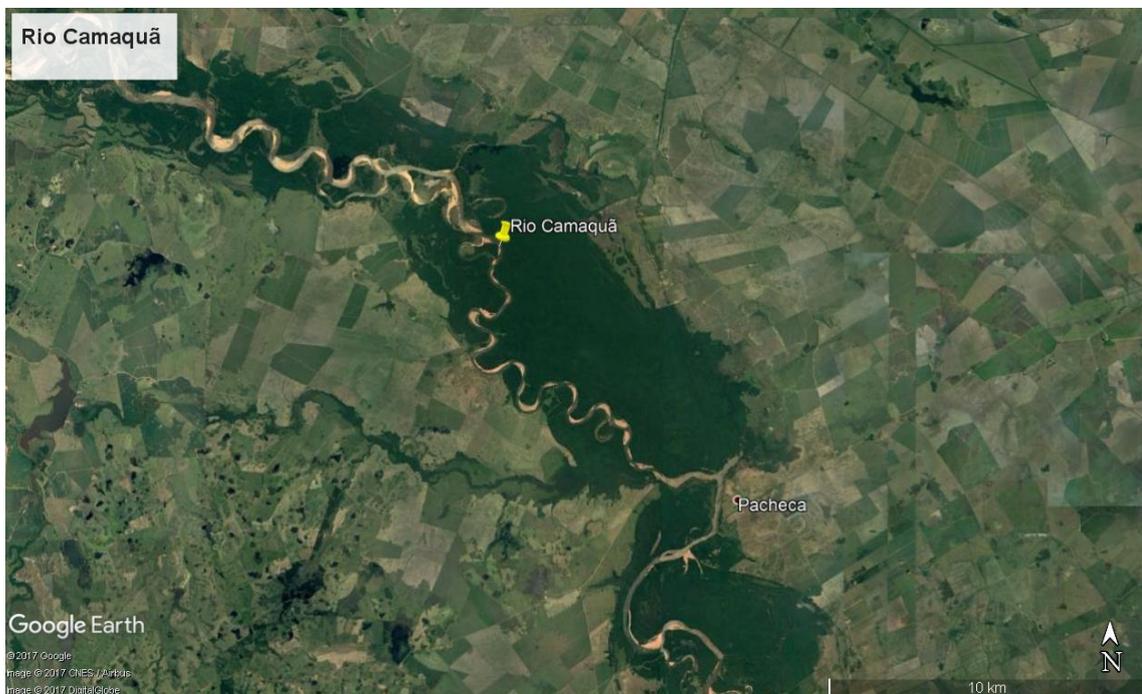


Figura 3 - Ponto selecionado no rio Purus, através do Google Earth.

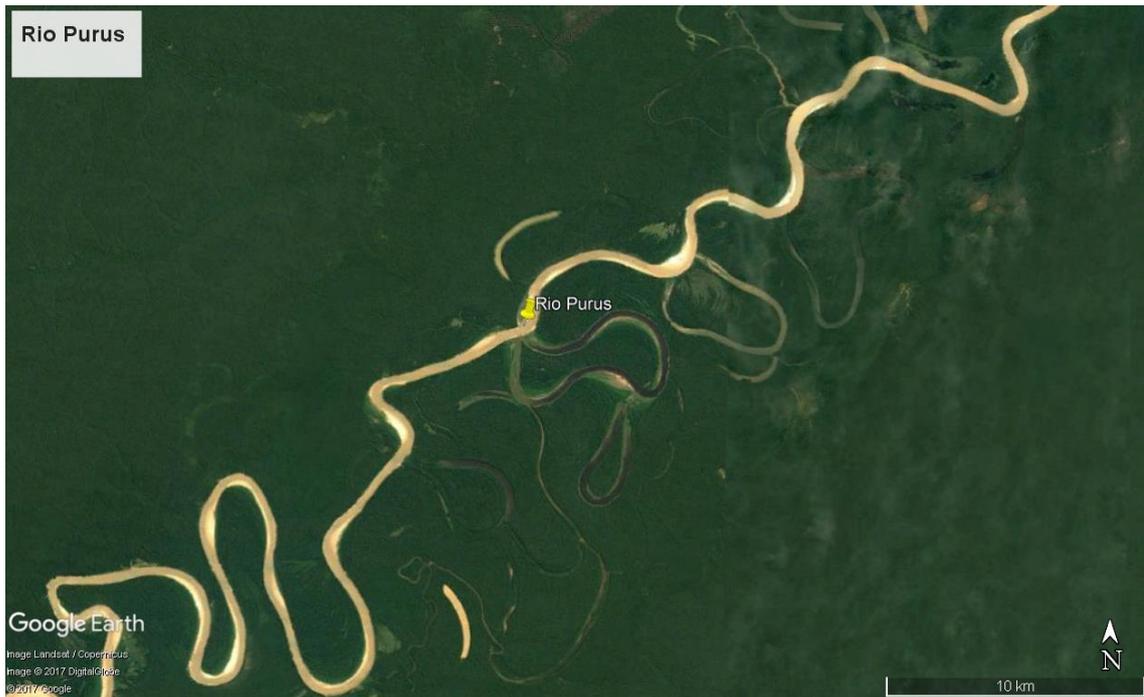


Figura 4 - Ponto selecionado no rio Taquari, através do Google Earth.



Adicionalmente, foram obtidos dados de vazão de estações fluviométricas localizadas o mais próximo possível dos pontos selecionados (Tabela 1). Os dados da Rede Hidrometeorológica Nacional, que inclui as estações fluviométricas, são

disponibilizados pela Agência Nacional de Águas (ANA), através da plataforma HidroWeb (<http://www.snirh.gov.br/hidroweb/>).

Tabela 1 - Coordenadas dos pontos e estações fluviométricas selecionados para cada rio.

Rio	Coordenada do ponto de referência	Posto fluviométrico	Código da estação	Coordenada do posto	Período com dados disponíveis	Área de drenagem (km ²)
Camaquã	31°03'29,96"S	Passo do	87905000	31°00'36,00"S	1964-2017	15600
	51°51'46,96"O	Mendonça		52°02'60,00"O		
Purus	07°31'21,62"S	Canutama	13880000	06°32'24,00"S	1973-2016	236000
	65°23'50,20"O			64°23'24,00"O		
Taquari	18°25'51,29"S	Coxim	66870000	18°30'28,08"S	1966-2007	27600
	54°51'04,59"O			54°45'42,84"O		

Os dados da vazão média das estações fluviométricas foram utilizados para a obtenção da vazão média de cada mês e para o cálculo da vazão específica (Equação 1) de cada rio para os períodos disponíveis. Objetivou-se assim determinar um período de estiagem para cada um dos rios, de forma que a seleção dos dados de sensoriamento remoto pudesse ser feita com menor influência da sazonalidade. No período de estiagem, os rios geralmente encontram-se contidos em sua calha principal, facilitando a observação das migrações laterais. Foram utilizados todos os dados de vazão disponíveis, consistidos e não-consistidos, no cálculo da vazão média de cada mês. Para analisar as mudanças progressivas dos cursos dos rios ao longo do tempo, considerou-se adequada a seleção de apenas uma imagem para cada ano disponível, preferencialmente do período de estiagem.

$$q = \frac{Q_m}{A} \quad (1)$$

Onde:

q = Vazão específica (L.s⁻¹.km⁻²)

Q_m = Vazão média mensal (L.s⁻¹)

A = Área de drenagem da estação fluviométrica (km²)

5.1 IMAGENS LANDSAT

A análise utilizou dados de sensoriamento remoto obtidos pelos satélites Landsat 4-5, 7 e 8 (agrupados na *Landsat Collection*), operados pelo *United States Geological Survey* (USGS) e disponibilizados através do *EarthExplorer* (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). A *Landsat Collection* começou a ser organizada pelo USGS em 2016 e possui dados consistidos com qualidade adequada para análises temporais, a partir de março de 1984 até o período atual. É uma coleção formada por produtos de *Level-1*, gerados pelos sensores *Thematic Mapper* (TM) do satélite Landsat 4-5, *Enhanced Thematic Mapper Plus* (ETM+) do satélite Landsat 7 e *Operational Land Imager* (OLI)/*Thermal Infrared Sensor* (TIRS) do satélite Landsat 8 (USGS 2017).

Os produtos de *Level-1 da Landsat Collection* possuem correção radiométrica, geométrica, de precisão e correção de erro de paralaxe com uso de modelo digital de elevação. São disponibilizados no formato GeoTIFF, com pixels de 30 metros, projeção no sistema Universal Transverso de Mercator (UTM) e *datum World Geodetic System 1984* (WGS84) (USGS, 2016).

A seleção das imagens da *Landsat Collection* foi realizada com base nos critérios: coordenada, cobertura de nuvens, categoria dos dados e mês do ano. Para cada um dos rios foram utilizadas as coordenadas selecionadas previamente através do Google Earth. Estabeleceu-se a categoria dos dados *Tier 1*, pois nesta categoria encontram-se os produtos com a melhor qualidade disponível, radiometria bem caracterizada e intercalibrados entre diferentes sensores (USGS, 2017). Procurou-se selecionar imagens dos meses que apresentaram menor vazão média, de acordo com os dados obtidos através da plataforma HidroWeb, e cobertura de nuvens inferior a 10%.

5.2 PROCESSAMENTO DAS IMAGENS

Os dados de sensoriamento remoto obtidos foram processados no software IDRISI Selva (CLARK LABS, 2012) e após no software ArcGIS 10.3 (ESRI, 2014). Para reduzir a quantidade de dados processados, as imagens Landsat foram recortadas utilizando a ferramenta Window do IDRISI Selva, já que a abrangência das imagens excedia as áreas de estudo.

5.2.1 Cálculo do Índice da Diferença Normalizada da Água (NDWI)

Para ressaltar as feições dos corpos d'água, os arquivos no formato GeoTIFF dos rios Camaquã, Purus e Taquari obtidos no *EarthExplorer* foram convertidos para arquivos raster e a ferramenta *Image Calculator* do IDRISI Selva foi utilizada para calcular o Índice da Diferença Normalizada da Água (*Normalized Difference Water Index* – NDWI). Este índice, proposto por McFeeters (1996), foi derivado a partir de princípios semelhantes aos do Índice da Diferença Normalizada da Vegetação (NDVI), mas utiliza a banda espectral do infravermelho próximo e a banda espectral do verde, segundo a Equação 2 apresentada abaixo. Segundo McFeeters (1996), a seleção destas bandas permite: maximizar a reflectância típica da água por utilizar o comprimento de onda verde; minimiza a baixa reflectância da água ao infravermelho próximo; e se aproveita da alta reflectância apresentada pela vegetação e pelo solo na banda do infravermelho próximo para realçar o contraste destes com os corpos d'água.

$$NDWI = \frac{(GREEN - NIR)}{(GREEN + NIR)} \quad (2)$$

Onde:

GREEN = Banda espectral do verde

NIR = Banda espectral do infravermelho próximo

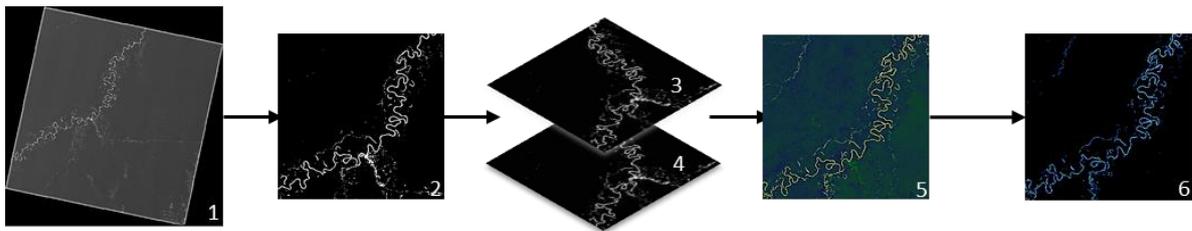
A banda 2 dos satélites Landsat 4, 5 e 7 corresponde à banda espectral do verde. A banda 3 corresponde à banda espectral do verde para o Landsat 8. A banda 4 corresponde à banda espectral do infravermelho próximo para o Landsat 4, 5 e 7. A banda 5 corresponde à banda espectral do infravermelho próximo para o Landsat 8 (USGS, 2017).

O índice resultante varia entre -1 e +1, tendo zero como limiar. Solo e vegetação terrestre apresentam valor 0 ou negativo, devido a sua alta reflectância ao infravermelho. Valores positivos representam os corpos d'água (McFEETERS, 1996).

Reclassificando as imagens obtidas com a ferramenta *Reclass* do IDRISI Selva, é possível eliminar a informação de vegetação e solo, retendo apenas a informação de água. Isso é feito atribuindo-se valor 0 para pixels com valores iguais ou menores que zero e atribuindo valor 1 para pixels com valores positivos. Obtém-se assim uma

imagem binária dos corpos d'água. Aplicando este procedimento para cada um dos rios avaliados, obteve-se uma imagem binária do rio para cada ano disponível na *Landsat Collection* (Figura 5).

Figura 5 - Esquema da obtenção da imagem binária: (1) Imagem Landsat; (2) Recorte da área de estudo; (3) Banda do verde e (4) Banda do NIR são utilizadas para o cálculo do (5) NDWI, que é reclassificado resultando na (6) Imagem binária.



Xu (2006) propôs uma modificação no NDWI, utilizando a banda espectral do infravermelho de ondas curtas (banda 5 para os Landsat 4, 5 e 7 e banda 6 para o Landsat 8). O índice gerado, *Modified Normalized Difference Water Index* (MNDWI), seria capaz de reduzir o ruído de áreas urbanas construídas, solo e vegetação, mas, para um resultado melhor, necessitaria de um ajuste manual do limiar. Os trechos de rio estudados não se localizavam dentro de grandes áreas urbanizadas, portanto optou-se por utilizar o índice de McFeeters. Ressalta-se que Gao (1996) também propôs um NDWI. Entretanto, seu índice foi desenvolvido para detectar a água líquida presente na vegetação, com aplicações na área de silvicultura e agricultura. Embora o índice tenha o mesmo nome, sua aplicação para detecção de corpos d'água não é adequada.

5.2.2 Reconstrução da migração lateral dos canais fluviais

A reconstrução da migração lateral dos trechos selecionados dos rios Camaquã, Purus e Taquari, no período analisado, foi realizada através da sobreposição das imagens de cada ano. A sobreposição foi feita utilizando imagens binárias dos rios. Para o rio Purus, os dados do canal fluvial também foram vetorizados e os vetores das linhas centrais de cada ano foram simplesmente sobrepostos.

5.2.2.1 Sobreposição das imagens binárias dos rios

As imagens binárias dos rios Purus e Taquari, obtidas a partir da reclassificação do NDWI, foram sobrepostas utilizando o operador matemático *Cover*, da *Image Calculator* do IDRISI Selva. Nesta operação, os pixels da primeira imagem cobrem os pixels da segunda imagem, exceto onde a primeira imagem apresenta valores iguais a zero. Desta forma, a imagem do primeiro ano foi coberta com a imagem do ano seguinte, e assim sucessivamente. Multiplicando cada imagem binária do NDWI por um valor diferente entre 1 e 255, ao realizar a sobreposição, é possível identificar os pixels que diferem entre um ano e outro.

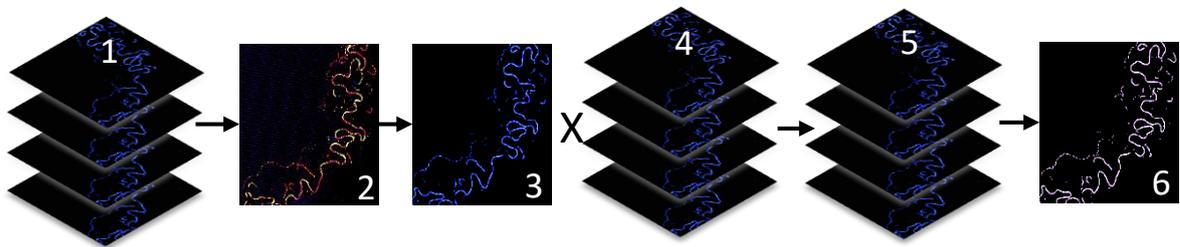
Para o rio Camaquã, dois operadores matemáticos da *Image Calculator* do IDRISI Selva foram utilizados para sobrepor as imagens: *Add*, que realiza a soma de imagens e *Cover*, que permite sobrepor uma imagem a outra.

Primeiro, as imagens obtidas após o cálculo e reclassificação do NDWI foram somadas utilizando o operador matemático *Add*. Na imagem resultante, os pixels com valores altos representam locais onde a água esteve presente mais vezes, enquanto pixels com valores baixos representam locais onde a água raramente esteve presente durante o período avaliado. Considerou-se que os pixels com valores baixos representam variações sazonais, não completamente evitadas na seleção preferencial das imagens, ou eventos extremos. Considerou-se também que as migrações laterais dos rios são, nos casos estudados, alterações relativamente lentas e progressivas e que canais fluviais de anos consecutivos teriam alta sobreposição. Assim, o resultado da soma permitiria identificar e eliminar eventos sazonais ou extremos únicos, além de gerar uma imagem que identifica os locais onde a água esteve presente mais vezes ao longo do período estudado.

A imagem resultante da soma foi reclassificada, atribuindo-se o valor zero aos pixels com valores de zero a três, e valor um para os pixels com valores de 4 a 34. O valor limiar foi arbitrado, considerando-se que eventos que apareciam em menos de 10% do total das imagens eram sazonais ou extremos. Obteve-se assim uma nova imagem binária, contendo a informação da localização do canal fluvial durante todo o período analisado, com menor influência de eventos sazonais ou extremos. O operador matemático *Multiply* da *Image Calculator* do IDRISI Selva foi então utilizado para multiplicar esta imagem por todas as imagens binária do NDWI.

As imagens resultantes da multiplicação foram sobrepostas utilizando o Cover da *Image Calculator* do IDRISI Selva. Assim como para os demais rios avaliados, um valor diferente entre 1 e 255 foi atribuído a cada uma das imagens, para que, na sobreposição final, fosse possível diferenciar os pixels onde a água esteve presente em cada ano. Um esquema da metodologia é apresentado na Figura 6.

Figura 6 - Esquema da sobreposição de imagens: (1) Imagens binárias do NDWI são somadas; o (2) Resultado da soma é reclassificado resultando em uma (3) Imagem binárias da soma, cuja multiplicação pelas Imagens binárias do NDWI, resulta em (4) Imagens binárias com reduzida influência de eventos sazonais ou extremos; atribuindo um valor diferente a cada uma destas e sobrepondo-as, o resultado é uma (5) Representação da migração do canal fluvial.



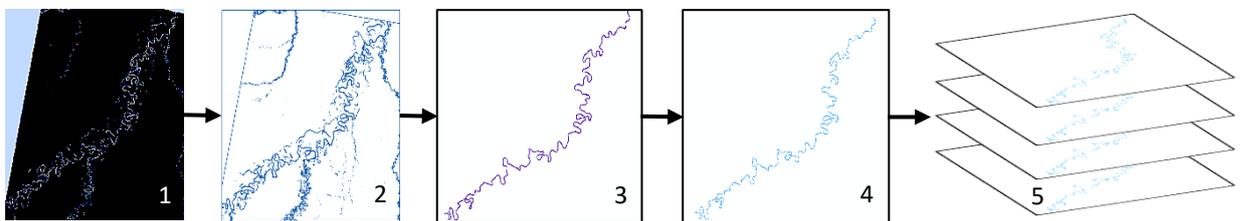
5.2.2.2 Sobreposição das linhas centrais do canal fluvial

As imagens binárias do rio Purus, obtidas a partir da reclassificação do NDWI, foram vetorizadas no software ArcGIS 10.3. Os arquivos raster foram convertidos a polígonos utilizando a ferramenta de conversão Raster para Polígono. Para eliminar vértices redundantes, utilizou-se a ferramenta de generalização Simplificar Polígono, com o algoritmo *Point Remove* e tolerância de 30 metros. Este algoritmo mantém os pontos críticos que compõem a forma essencial do polígono e remove os demais pontos. Os polígonos gerados foram então convertidos em linhas com a ferramenta de gerenciamento de dados Polígono para Linha. As linhas dos trechos do rio Purus foram selecionadas manualmente e seu conjunto exportado como um novo *shapefile*, sendo este, portanto, um arquivo vetorial representando o contorno do canal do trecho de rio avaliado.

A ferramenta de cartografia Transformar Linhas Duplas em Linhas Centrais foi utilizada para a obtenção da linha central do canal fluvial. Esta ferramenta deriva a linha central a partir de um par de linhas paralelas, baseada em valores determinados de tolerância para a largura. Foram utilizados os valores de 650 metros e 50 metros como valores de tolerância máxima e mínima, respectivamente. Como, dentre os rios

selecionados para este estudo, o rio Purus era o único com margens quase paralelas, a sobreposição das linhas centrais do canal fluvial foi realizada somente para o rio Purus. Para melhor visualização do resultado, utilizou-se a ferramenta Juntar para converter os 34 *shapefiles* em um único arquivo, diferenciando cada linha através da atribuição de uma cor diferente para cada ano. Um esquema da metodologia é apresentado na Figura 7.

Figura 7 - Esquema da sobreposição dos vetores das linhas centrais: a (1) Imagem binária foi convertida em (2) Imagem vetorizada; as linhas do canal fluvial do rio foram selecionadas gerando uma (3) Imagem do contorno do canal fluvial, a partir da qual se determinou a (4) Linha central do canal fluvial; as linhas centrais dos canais fluviais de cada ano foram sobrepostas.



5.3 DADOS ADICIONAIS

As migrações laterais ocorrem devido à erosão de taludes e depósito de sedimentos em diferentes pontos do rio. Portanto, para auxiliar a interpretação dos resultados, informações sobre o tipo de solo e declividade foram obtidos, pois alguns solos apresentam maior susceptibilidade à erosão e a declividade está associada à velocidade do escoamento, determinante no transporte de sedimentos.

Dados vetoriais dos tipos de solos dos estados do Amazonas e Rio Grande do Sul foram obtidos do GeoSGB, sistema de geociências do Serviço Geológico do Brasil, em escala de 1:1.000.000 para o Amazonas e de 1:750.000 para o Rio Grande do Sul (CPRM, 2017). Para o rio Taquari, obteve-se o arquivo vetorial do Mapa de Solos da Planície Pantaneira em escala de 1:250.000 (EMBRAPA, 2007). Os modelos digitais de elevação das áreas dos três rios foram obtidos no EarthExplorer. Optou-se por utilizar as imagens da *Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) 1 Arc-Second Global*, obtidas pelo ônibus espacial Endeavour em 2000. A Endeavour coletou dados de radar de 80% da superfície continental, entre 60° norte e 56° sul de latitude. As imagens possuem 30 metros de resolução e *datum* WGS84 (USGS, 2015).

Uma zona de 10 quilômetros ao redor dos trechos dos rios estudados foi estabelecida através da ferramenta *Buffer* do ArcGIS e o seu vetor utilizado para recortar os arquivos de tipos de solos e elevação. A ferramenta *Slope* do ArcGIS foi utilizada para determinar a declividade do terreno na área ao redor do rio. Dados de elevação do trecho do rio foram extraídos do modelo digital de elevação para o cálculo da declividade do canal fluvial através da Equação 3. O comprimento de cada rio foi obtido a partir dos dados vetoriais dos canais dos rios, obtidos a partir das imagens binárias dos rios para o ano 2000, mesmo ano das imagens da SRTM.

$$S = \frac{z_1 - z_2}{L} \quad (3)$$

Onde:

S = Declividade do trecho do rio (m.m⁻¹)

z₁ = Elevação do trecho a montante (m)

z₂ = Elevação do trecho a jusante (m)

L = Comprimento do trecho (m)

O índice de sinuosidade de cada trecho para os anos de 1984 e 2017 também foi calculado, através da Equação 4, a fim de verificar a influência da migração lateral sobre este. Os comprimentos dos trechos foram estimados a partir dos dados vetoriais dos canais dos rios, obtidos a partir das imagens binárias.

$$Is = \frac{L}{Ev}$$

Onde:

Is = Índice de sinuosidade

L = Comprimento do trecho (m)

Ev = Equivalente vetorial medido em linha reta (m)

6 RESULTADOS

Utilizando as coordenadas obtidas através do Google Earth, determinou-se a órbita e o ponto das imagens que continham os trechos dos rios selecionados (Tabela 2).

Tabela 2 - Órbita e ponto das imagens selecionadas para cada rio.

Rio	Órbita	Ponto
Camaquã	221	82
Purus	233	65
Taquari	225	73

Na análise dos dados das estações fluviométricas, o rio Camaquã apresentou menores vazões médias entre dezembro e maio (Figura 8). Entretanto, o período de estiagem não foi marcado como o dos rios Purus (Figura 9) e Taquari (Figura 10). Dados do período de estiagem foram selecionados para os rios Purus e Taquari. Entretanto, com os demais critérios impostos, não foi possível selecionar dados do período de estiagem para o rio Camaquã. As datas da obtenção de cada imagem utilizada são apresentadas no Apêndice A. Foram obtidas 34 imagens de cada rio, uma para cada ano do período de 1984 a 2017.

Figura 8 - Gráfico das vazões médias mensais do rio Camaquã. A área verde marca os meses do ano a partir dos quais as imagens Landsat foram selecionadas.

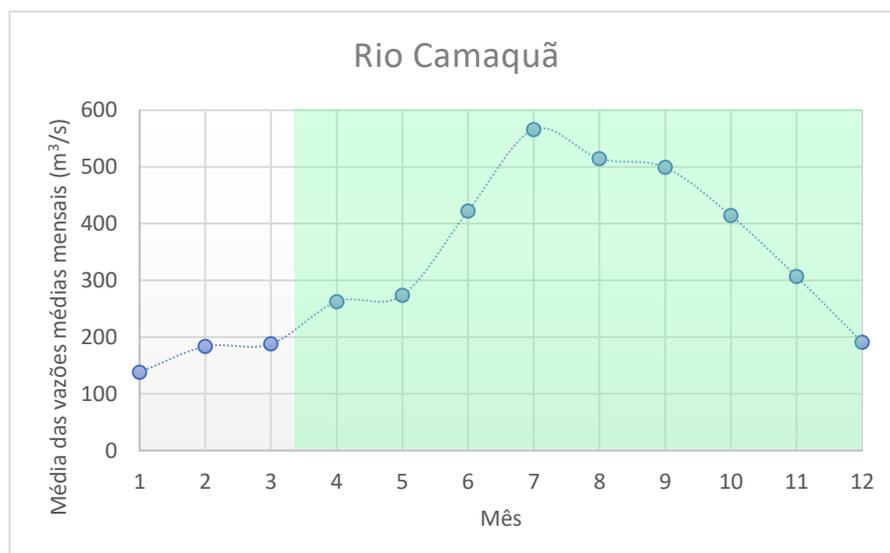


Figura 9 - Gráfico das vazões médias mensais do rio Purus. A área verde marca os meses do ano a partir dos quais as imagens Landsat foram selecionadas.

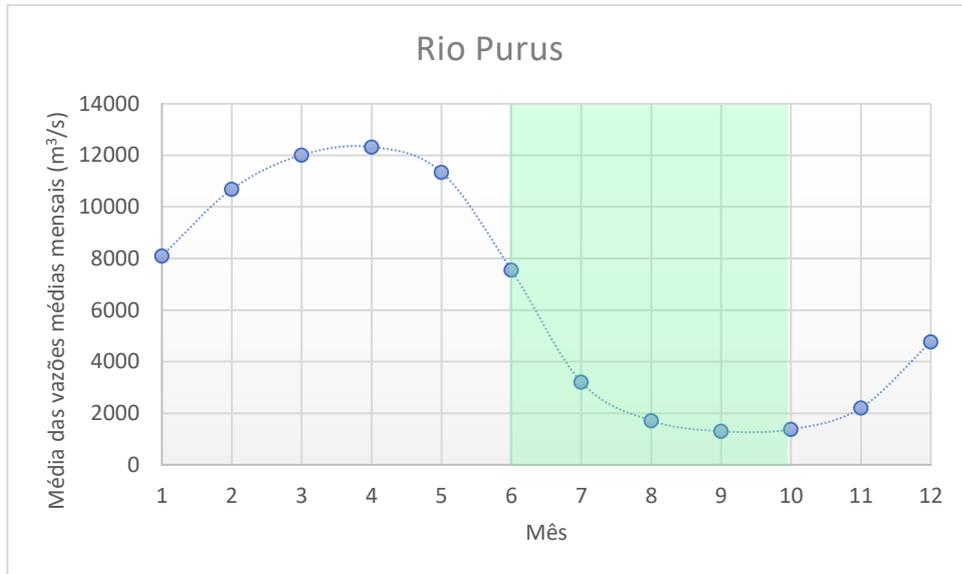
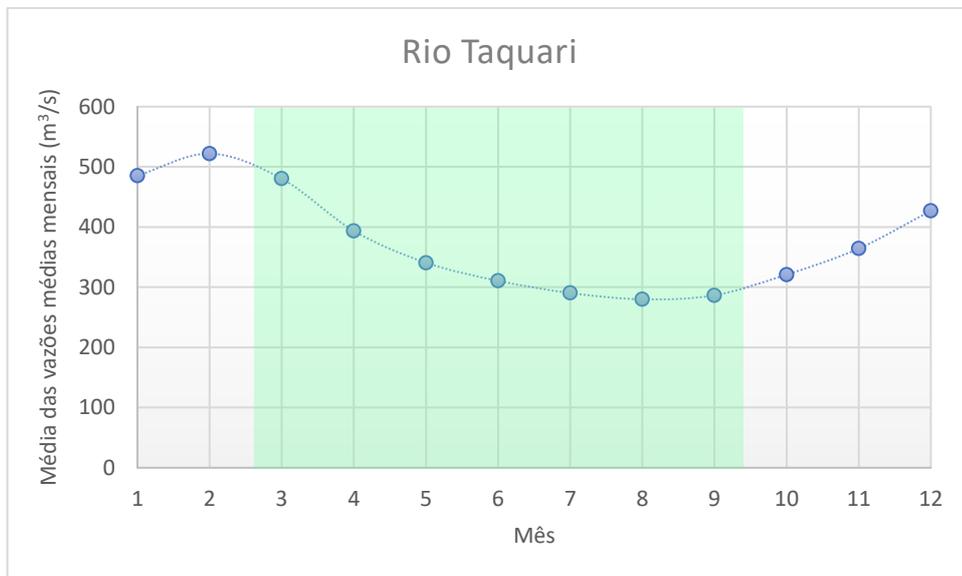
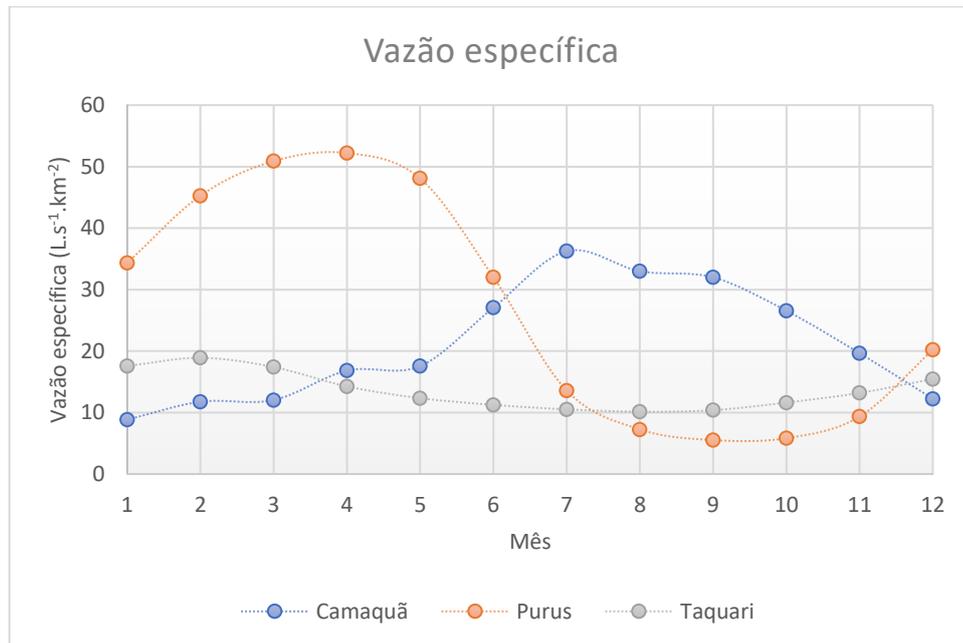


Figura 10 - Gráfico das vazões médias mensais do rio Taquari. A área verde marca os meses do ano a partir dos quais as imagens Landsat foram selecionadas.



A vazão específica é a vazão gerada por unidade de área. Observa-se, na Figura 11, que o rio Purus apresenta grande variação sazonal, atingindo valores inferiores aos demais rios durante o período de estiagem e valores muito superiores no período de chuvas.

Figura 11 - Vazão específica ($L \cdot s^{-1} \cdot km^{-2}$) dos rios Camaquã, Purus e Taquari.

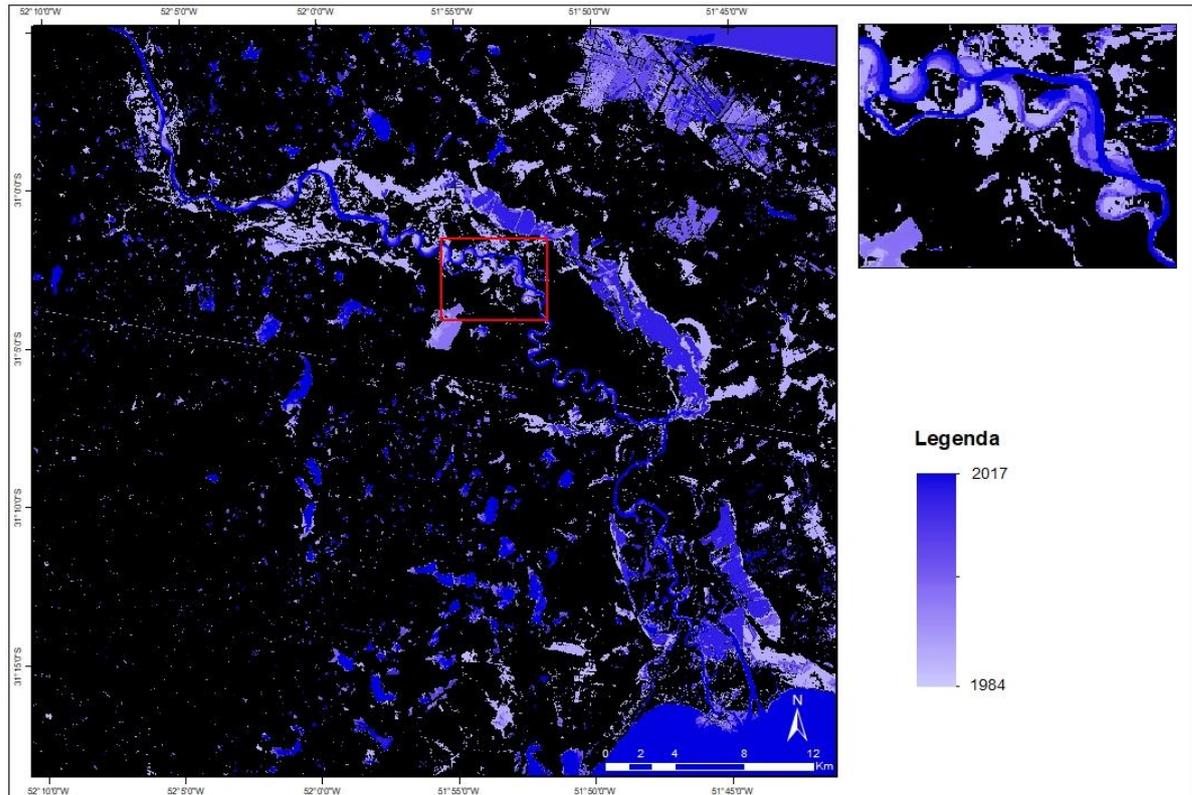


A vazão gerada por quilômetro quadrado no rio Taquari também sofre influência sazonal bem definida, embora a variação seja menor que a observada no rio Purus. O rio Camaquã não apresenta a mesma sazonalidade dos demais rios, apresentando valores quase constantes entre alguns meses (fevereiro e março, abril e maio, agosto e setembro), tendo maior vazão específica entre o inverno e primavera do hemisfério sul.

6.1 RIO CAMAQUÃ

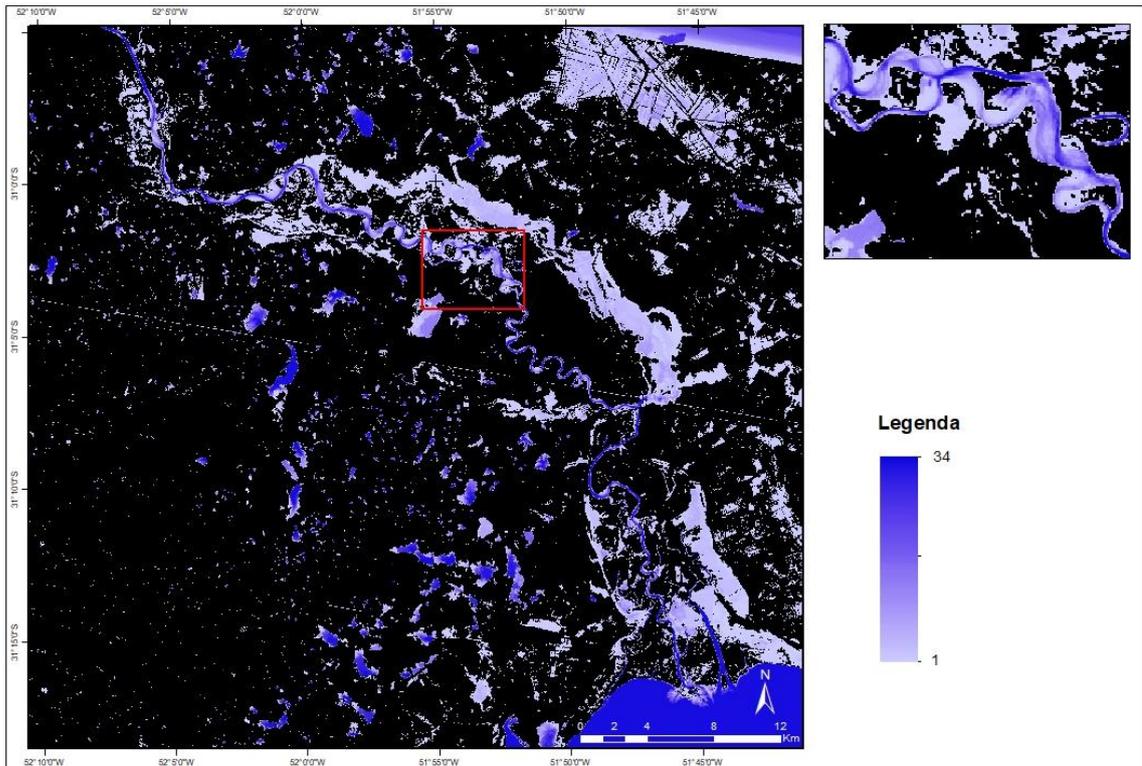
O resultado da sobreposição das imagens binárias do NDWI, realizada através da ferramenta Cover do IDRISI Selva, é apresentado na Figura 12. O rio Camaquã foi identificado através do NDWI, mas as extensas áreas inundáveis e banhados presentes na Planície Costeira onde o trecho analisado se localiza dificultam sua visualização. Entretanto, é possível observar a movimentação de meandros.

Figura 12 - Sobreposição das 34 imagens binárias do rio Camaquã, Rio Grande do Sul, obtidas através do NDWI.



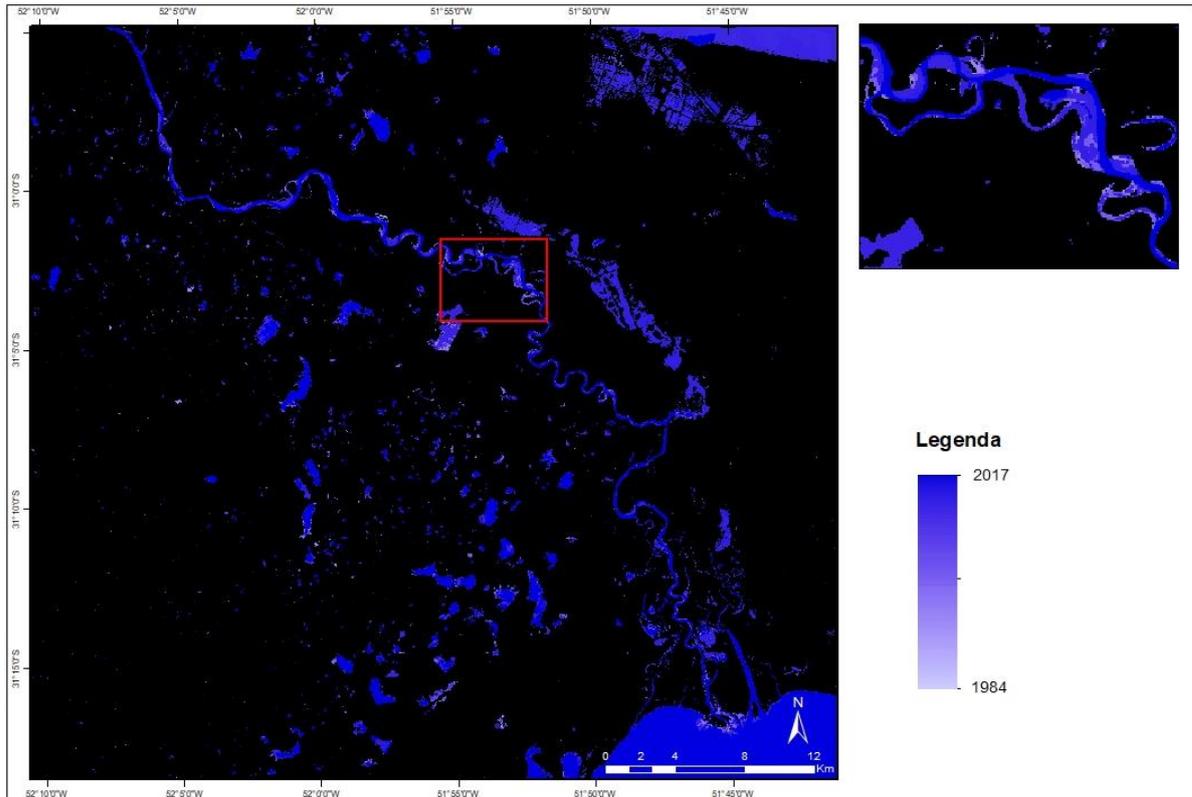
No resultado da soma de todas as imagens binárias (Figura 13), os pixels apresentam valores entre zero e 34. Onde o NDWI não identificou a presença de água, o valor é igual a zero. Pixels com valor 34 são pixels onde o NDWI identificou água em todos os anos do período. É possível observar que as áreas inundadas não apresentam pixels com valores elevados, pois a presença da água no local não foi constante ao longo dos 34 anos avaliados. O trecho do rio Camaquã é perene, estando a água presente em seu curso principal ao longo de todo o período analisado. Os pixels que representam o canal fluvial, portanto, apresentam valores altos.

Figura 13 - Soma das imagens binárias do rio Camaquã, Rio Grande do Sul, de 1984 a 2017, obtidas através do NDWI. Em destaque um trecho onde ocorreram migrações laterais, mas a visualização é dificultada pela presença de áreas inundadas.



A eliminação de pixels com valores inferiores a 3 representou a eliminação de áreas que tiveram água em sua superfície em menos de 10% das imagens analisadas. Muitas das áreas inundadas foram eliminadas, facilitando a visualização do rio. O resultado da sobreposição de imagens após a multiplicação dos resultados do NDWI pela soma binária é apresentado na Figura 14.

Figura 14 - Resultado da multiplicação da imagem binária da soma pela sobreposição das imagens do rio Camaquã, Rio Grande do Sul.

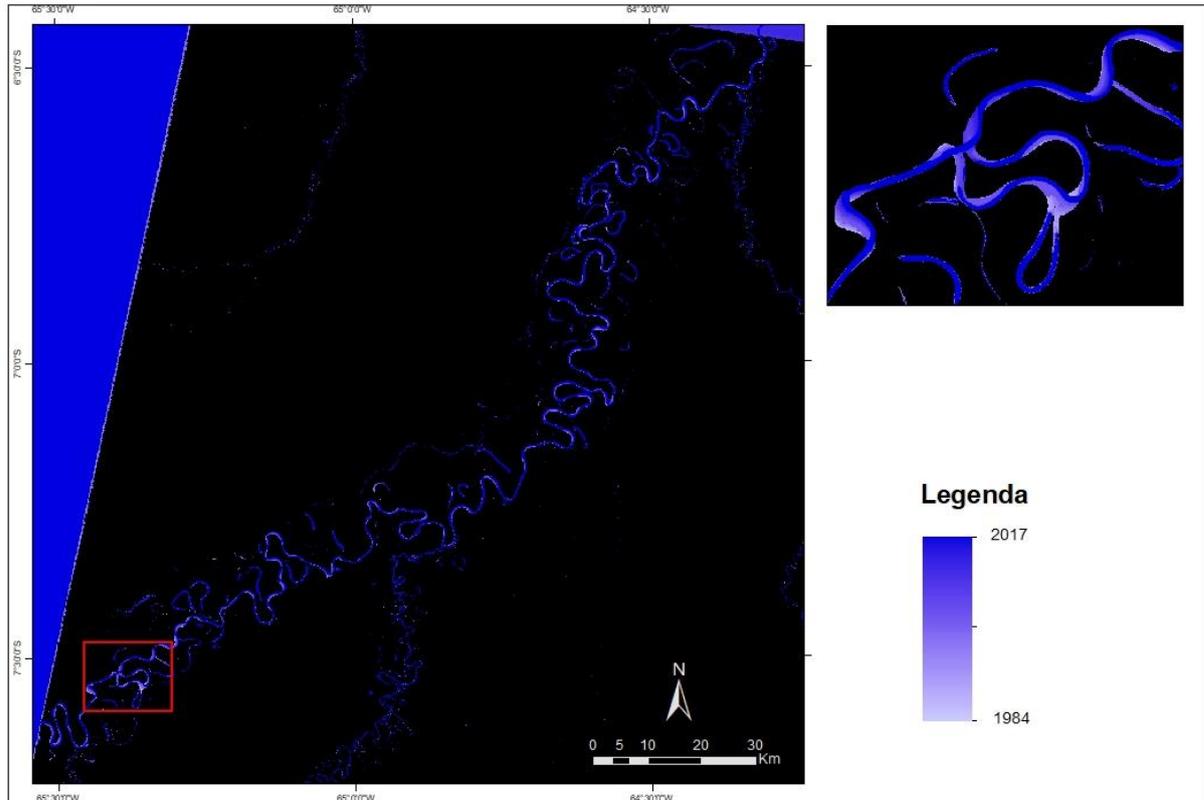


É possível observar o curso do rio em 2017 sobreposto sobre os demais anos e as diferenças entre os anos. Muitas áreas inundadas identificadas pelo NDWI foram eliminadas.

6.2 RIO PURUS

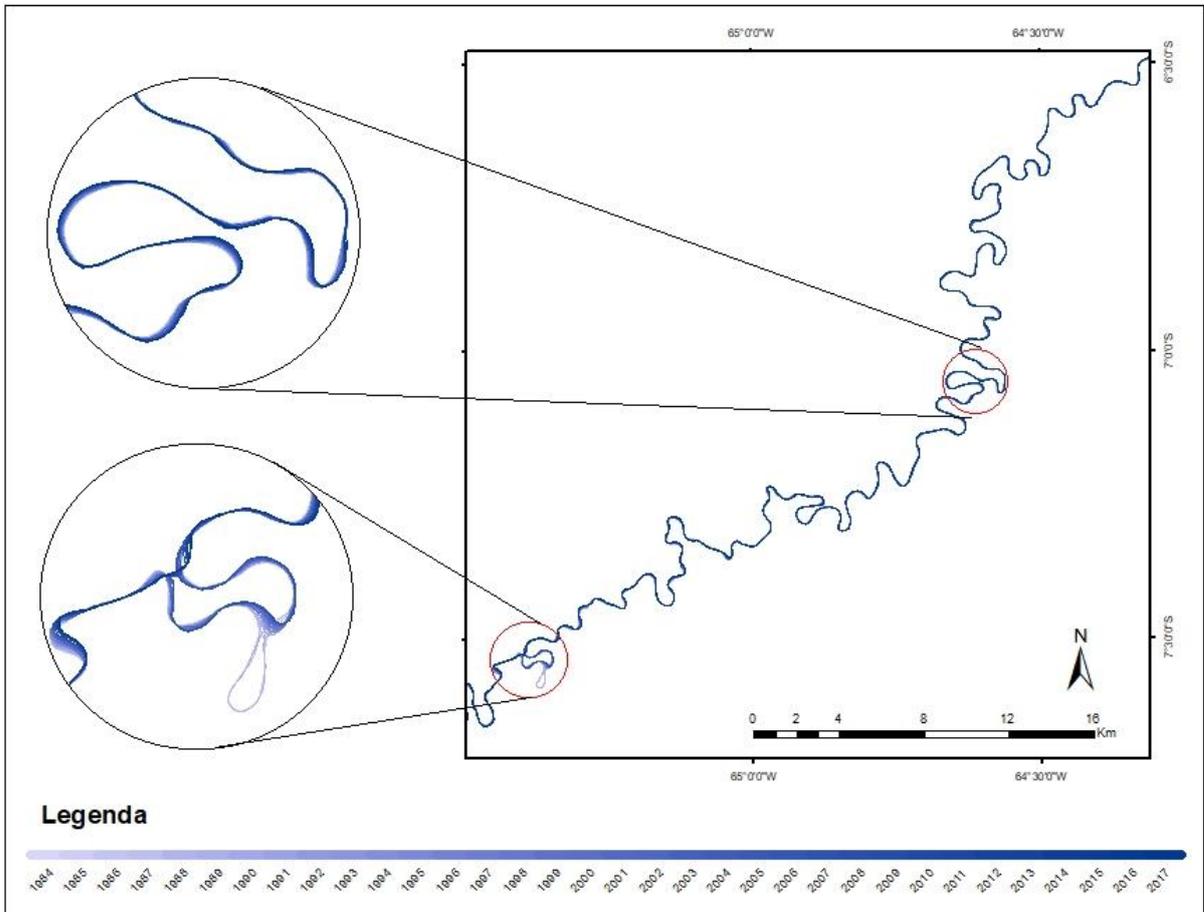
Um trecho do resultado da sobreposição das imagens binárias do NDWI, realizada através da ferramenta Cover do IDRISI Selva, é apresentado na Figura 15. Observa-se o curso do rio em 2017 sobreposto sobre os demais anos. É possível observar o abandono de um meandro na porção a montante do trecho estudado.

Figura 15 - Sobreposição das imagens binárias do rio Purus, Amazonas, de 1984 a 2017. Em destaque, o abandono de um meandro ocorrido durante o período.



Através da identificação da linha central do canal fluvial é possível observar o movimento do rio e o progressivo abandono do meandro a montante do trecho estudado (Figura 16). Primeiramente, uma alça mais distal é abandonada entre os anos de 1987 e 1990. Cerca de dezessete anos depois, entre os anos de 2007 e 2009, o meandro é completamente abandonado.

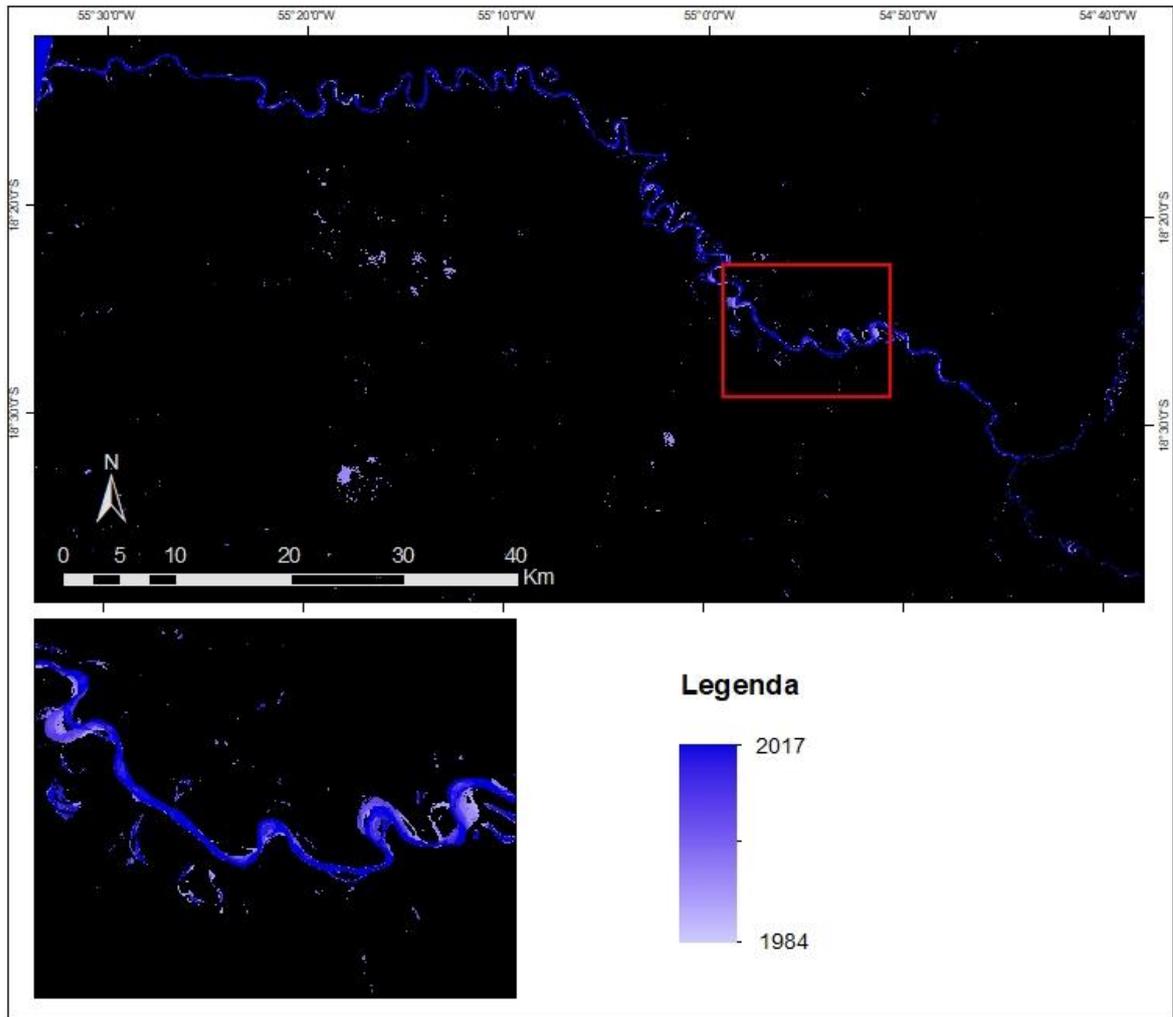
Figura 16 - Sobreposição da linha central rio Purus, Amazonas, de 1984 a 2017. Em destaque o movimento que tende ao "estrangulamento" do meandro localizado a jusante do trecho estudado e o abandono gradual de um meandro localizado a montante do trecho estudado.



6.3 RIO TAQUARI

Um trecho do resultado da sobreposição das imagens binárias do NDWI, realizada através da ferramenta Cover do IDRISI Selva, é apresentado na Figura 17. O maior valor representa o curso do rio em 2017 e o menor, em 1984.

Figura 17 - Sobreposição de imagens binárias do rio Taquari, Mato Grosso do sul, de 1984 a 2017. Em destaque, o movimento dos meandros.



6.4 DADOS ADICIONAIS

Através dos dados de elevação dos trechos dos rios estudados estimados a partir dos modelos digitais de elevação (Figuras 18, 19 e 20) e do comprimento aproximado de cada trecho, calculou-se a declividade (Tabela 3). Os trechos dos rios escolhidos percorriam planícies, portanto os valores de declividade baixos eram esperados. Os rios Camaquã e Taquari apresentaram valores de declividade próximos. O rio Purus apresentou a declividade mais baixa, sendo o rio com menor diferença entre a elevação a montante e jusante e maior comprimento.

Tabela 3 - Declividade dos trechos dos rios estudados.

Rio	Comprimento do trecho (m)	Elevação montante (m)	Elevação jusante (m)	Declividade ($m.m^{-1}$)
Camaquã	87171	30	1	0,00033
Purus	464549	63	44	0,00004
Taquari	196338	214	151	0,00032

Figura 18 - Modelo digital de elevação da zona de 10 quilômetros ao redor do trecho do rio Camaquã, Rio Grande do Sul.

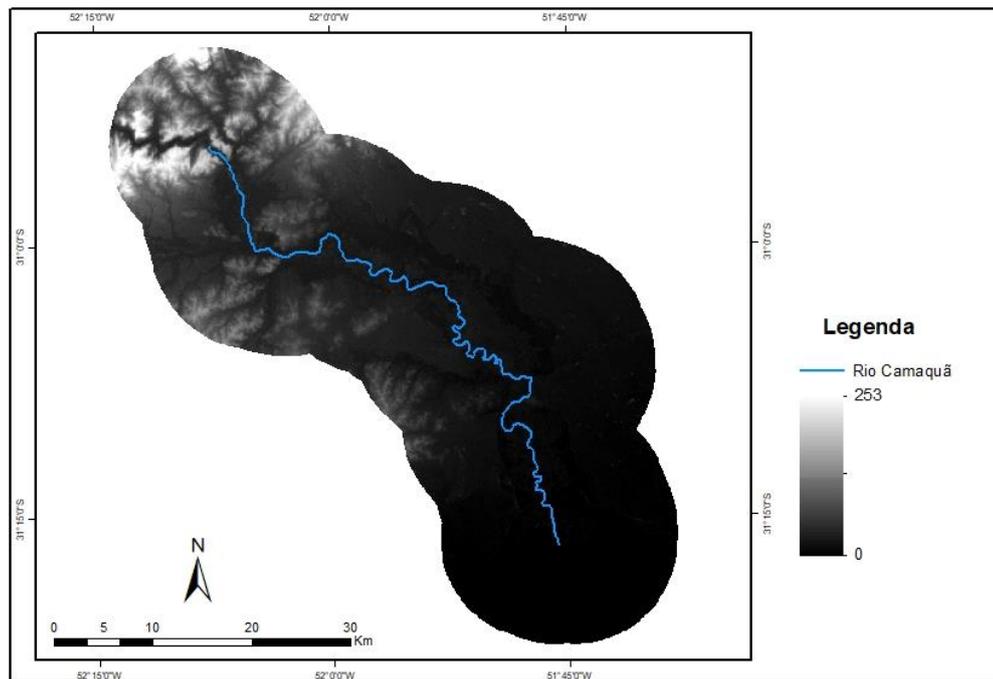


Figura 19 - Modelo digital de elevação da zona de 10 quilômetros ao redor do trecho do rio Purus, Amazonas.

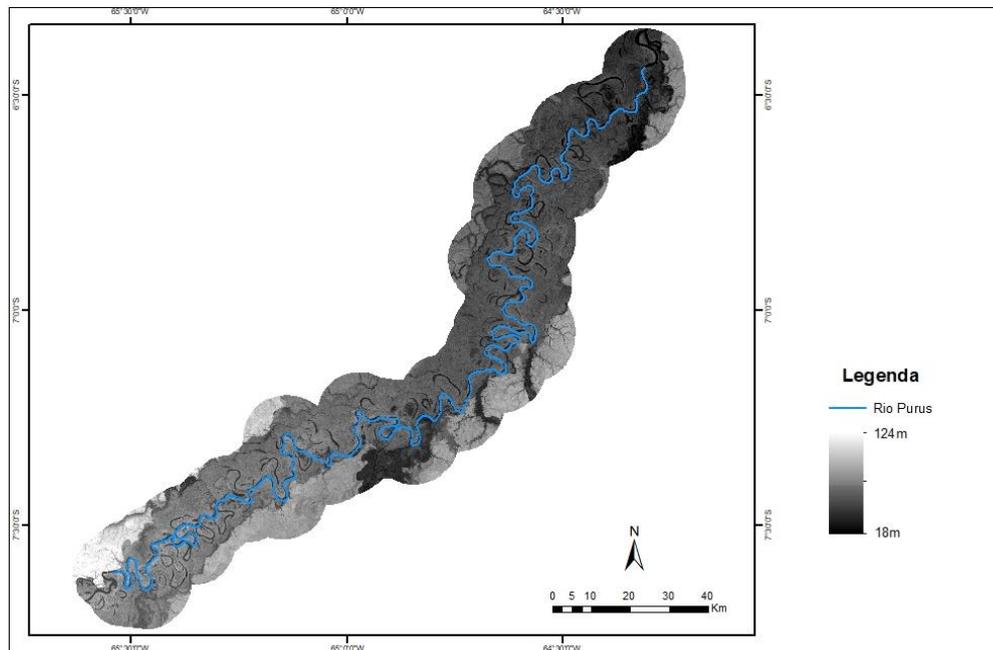
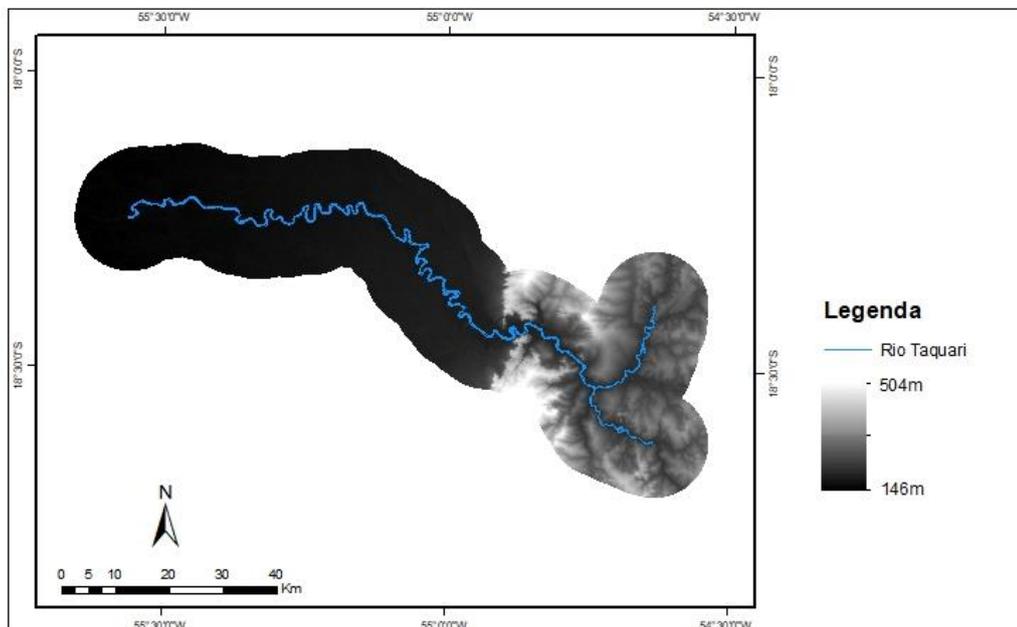


Figura 20 - Modelo digital de elevação da zona de 10 quilômetros ao redor do trecho do rio Taquari, Mato Grosso do Sul.



Observa-se que os trechos dos rios Camaquã e Taquari escolhidos para o estudo abrangem a transição entre planalto e planície (Planície Costeira para o rio Camaquã e Planície do Pantanal para o rio Taquari). Portanto uma maior declividade era esperada para estes rios quando comparados ao rio Purus, cujo trecho escolhido

não apresenta esta transição. Este fato também fica evidente nos mapas de declividade obtidos (Figuras 21, 22 e 23).

Figura 21 - Declividade percentual da zona de 10 quilômetros ao redor de trecho do rio Camaquã, Rio Grande do Sul.

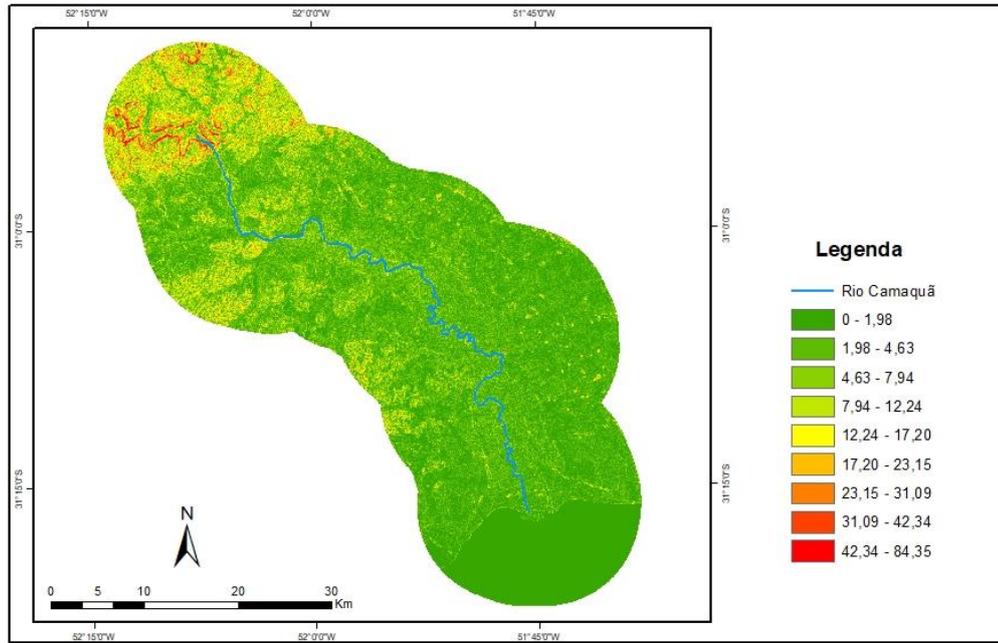


Figura 22 - Declividade percentual da zona de 10 quilômetros ao redor de trecho do rio Purus, Amazonas.

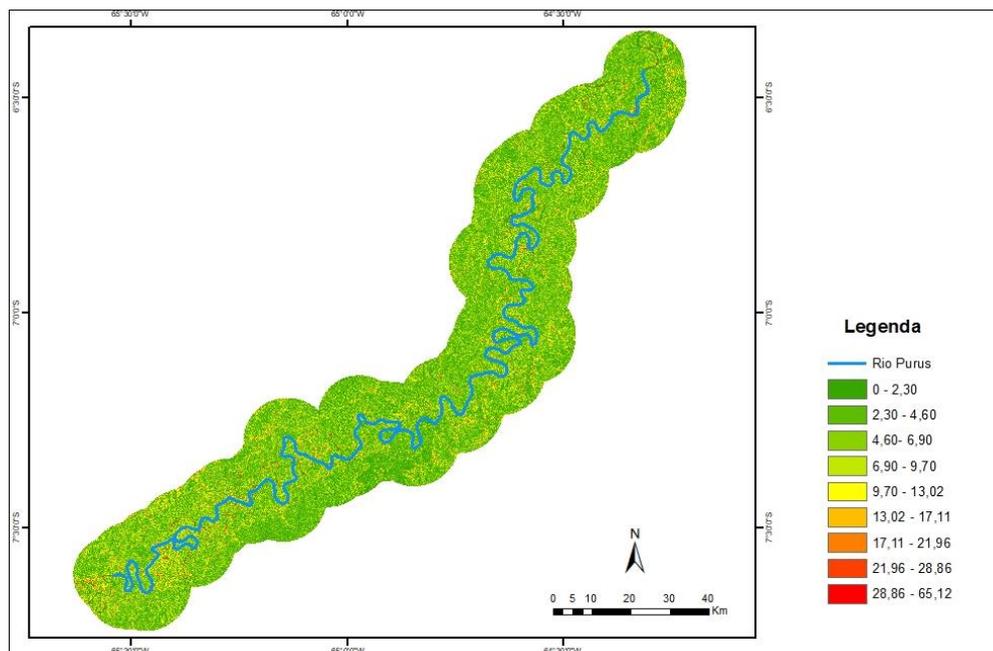
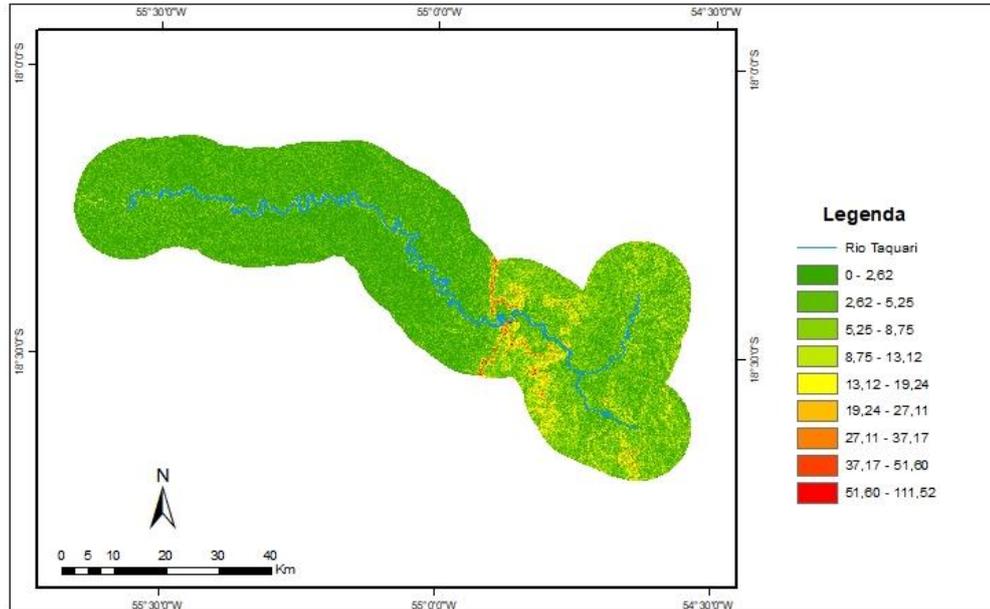
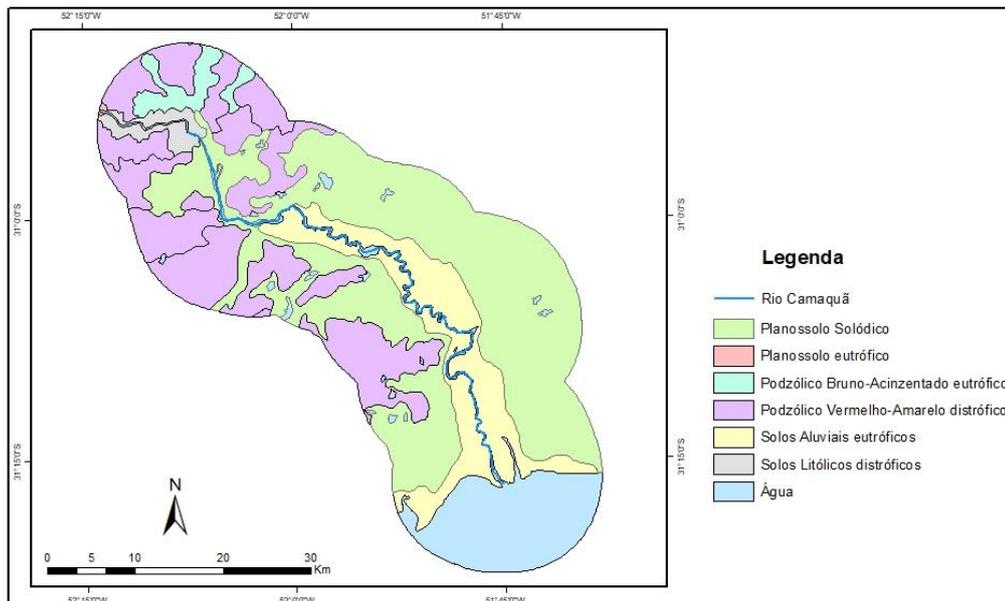


Figura 23 - Declividade percentual da zona de 10 quilômetros ao redor de trecho do rio Taquari, Mato Grosso do Sul.



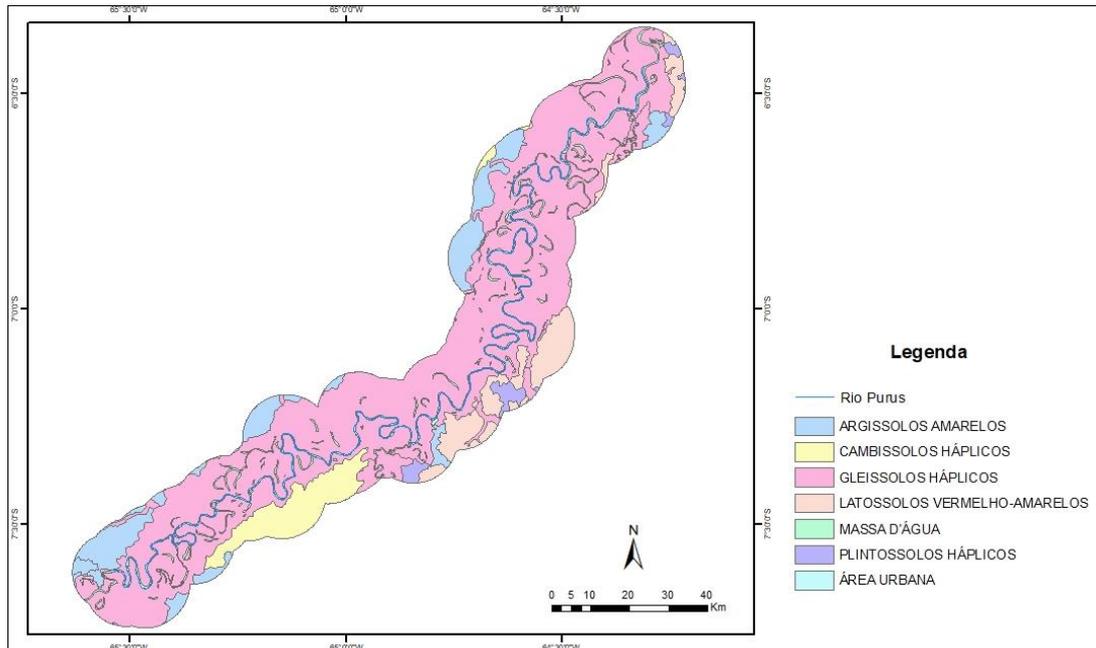
Os mapas de tipos de solos das zonas de 10 quilômetros ao redor dos trechos dos rios são apresentados nas Figuras 24, 25 e 26.

Figura 24 - Tipos de solos na zona do trecho do rio Camaquã, Rio Grande do Sul.



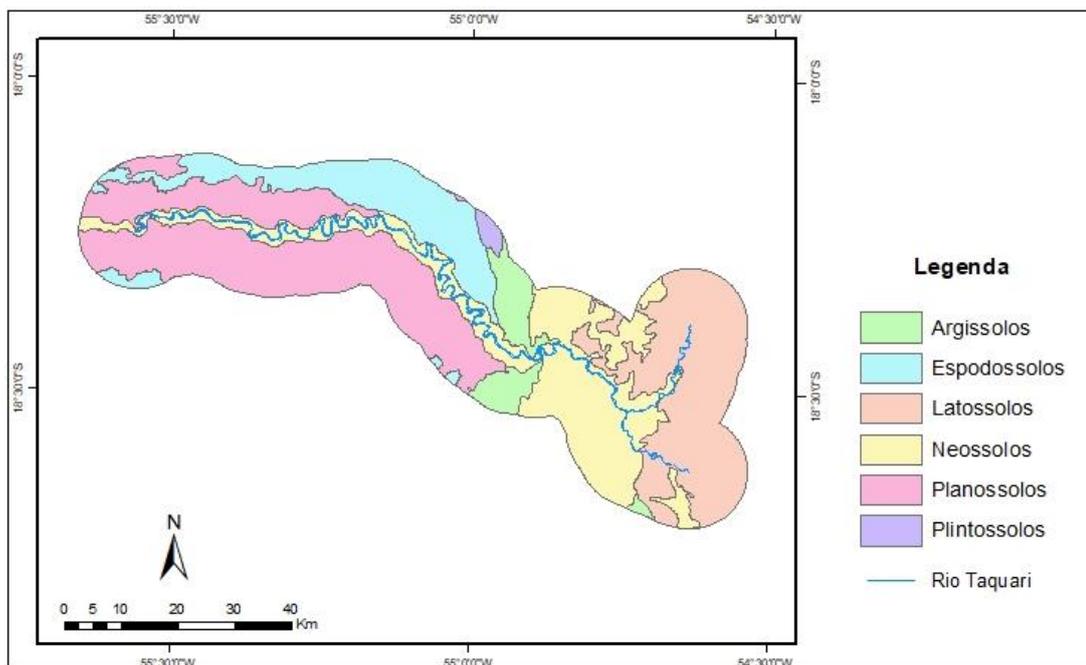
Na porção meandrante do rio, há o predomínio dos solos aluviais eutróficos na planície de inundação. Na porção a montante, no planalto, há predomínio do planossolo solódico e dos solos litólicos distróficos.

Figura 25 - Tipos de solos na zona do trecho do rio Purus, Amazonas.



Os gleissolos háplicos predominam na planície de inundação do trecho estudado do rio Purus.

Figura 26 - Tipos de solos na zona do trecho do rio Taquari, Mato Grosso do Sul.



No planalto, há o predomínio dos latossolos ao redor do rio Taquari. Após a transição para a Planície do Pantanal, os neossolos passam a ser predominantes na planície de inundação.

O comprimento dos trechos estudados foi obtido para os anos de 1984 e 2017. Utilizou-se os mesmos pontos de referência a montante e jusante para determinação do equivalente vetorial da menor distância de cada trecho para os anos de 1984 e 2017. O índice de sinuosidade calculado a partir destes valores é apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 – Índice de sinuosidade dos rios Camaquã, Purus e Taquari para os anos de 1984 e 2000.

Rio	Ano	Comprimento do trecho (m)	Equivalente vetorial (m)	Índice de sinuosidade
Camaquã	1984	91240	54877	1,66
	2017	88552		1,61
Purus	1984	459600	186157	2,47
	2017	455561		2,45
Taquari	1984	191042	98888	1,93
	2017	192183		1,94

O rio Purus apresentou maior sinuosidade entre os rios avaliados. A variação da sinuosidade entre os anos de 1984 e 2017 para os três rios foi da ordem de grandeza centesimal, sendo de apenas 0,01 para o rio Taquari.

7 DISCUSSÃO

Produtos obtidos a partir do sensoriamento remoto, como as imagens da *Landsat Collection*, têm crescente importância na avaliação de fenômenos da superfície terrestre. A *Landsat Collection* disponibiliza imagens para um período que já supera três décadas e permite a avaliação de grandes extensões territoriais. Isso representa um subsídio importante para o entendimento dos fenômenos naturais e das consequências das alterações antrópicas ocorridas nas últimas décadas. É preciso considerar, entretanto, que existem algumas restrições ao seu uso. A resolução de 30 metros das imagens, por exemplo, impede sua utilização na avaliação de rios de pequeno porte.

Problemas na geração dos produtos também devem ser considerados. Em 31 de maio de 2003, o *Scan Line Corrector* do satélite Landsat 7 falhou, fazendo com que a linha de visão do satélite traçasse um zigue-zague, resultando em imagens duplicadas que, ao serem processadas, resultam em cenas com 22% dos pixels sem dados (USGS, 2017). Como o Landsat 5 permaneceu em atividade até novembro de 2011, neste estudo optou-se por utilizar imagens do Landsat 5 para o período de 1984 a 2011. Entretanto, como o Landsat 8 foi lançado apenas em fevereiro de 2013, foi necessário utilizar as imagens do Landsat 7 para o ano de 2012. Além disso, com os critérios impostos na seleção de imagens, não havia nenhuma imagem do rio Purus obtida pelo Landsat 5 disponível para o ano de 2002, sendo necessário utilizar uma imagem do Landsat 7.

Os períodos de estiagem descritos na literatura para os rios Purus e Taquari foram semelhantes aos períodos que apresentaram as menores vazões na análise dos dados fluviométricos. Não foi possível associar a data de obtenção das imagens à vazão daquele dia pois os períodos de dados disponíveis para vazão não eram equivalentes aos períodos de obtenção das imagens. Foram utilizados todos os dados disponíveis de vazão, consistidos e não-consistidos, das estações fluviométricas pois considerou-se que não havia necessidade de alta precisão na determinação do período de estiagem.

Ao impor os critérios de cobertura de nuvens inferior a 10% e disponibilidade de dados com qualidade *Tier 1*, a quantidade de imagens disponíveis para os meses de menor vazão foi reduzida. Além disso, mesmo impondo o critério de 10% de cobertura de nuvens, ainda foi necessário selecionar imagens com menor presença

de nuvens visualmente. Para os rios Purus e Taquari, a obtenção de imagens dos meses de estiagem foi possível. Como descrito na bibliografia, as chuvas têm distribuição uniforme durante o ano na região da bacia do rio Camaquã, tornando difícil a obtenção de imagens adequadas para a análise deste rio.

O NDWI proposto por McFeeters (1996) se mostrou adequado para a análise proposta, ressaltando os corpos d'água das demais feições. Seu cálculo é simples e, por apresentar o limiar fixo em zero, tem aplicação facilitada na análise de séries temporais longas, com grande quantidade de imagens. Outros índices propostos para detecção de água exigem a reclassificação individual de cada imagem através da análise do histograma, o que torna a metodologia mais complexa.

No processamento das imagens, especialmente as imagens do rio Camaquã, notou-se que os critérios de seleção de imagens não eram suficientes para reduzir a influência sazonal e de eventos extremos. Algumas imagens nas séries temporais apresentavam áreas inundadas. No caso do rio Camaquã, a presença de lavouras irrigadas de arroz era evidente após o cálculo do NDWI. Como a presença de água nestas áreas não é constante ao longo do tempo, como ocorre nos cursos dos rios escolhidos, desenvolveu-se a metodologia para tentar minimizar os eventos de menor frequência que não eram do interesse desse estudo. Assim a soma das imagens binárias do NDWI foi introduzida. Entretanto, caso a variação no canal fluvial tenha ocorrido em um intervalo inferior a três anos, é possível que esta informação sobre a migração do canal fluvial tenha sido eliminada neste procedimento.

A ferramenta Transformar Linhas Duplas em Linhas Centrais foi utilizada por estar disponível na caixa de ferramentas do ArcGIS. Entretanto, seu uso é indicado para a criação de linhas centrais na representação de estruturas cujos contornos são paralelos, como estradas. Dentre os rios escolhidos, o rio cujo contorno do canal fluvial mais se assemelhava a uma estrada era o Purus. Portanto, o uso desta ferramenta na análise de rios demonstrou-se possível, entretanto restrito a rios com canais fluviais de margens paralelas. Ferramentas específicas para a determinação da linha central de canais fluviais são descritas na literatura. Schwenk *et al.* (2017), ao analisar a dinâmica espaço-temporal do rio Ucayali, utilizaram uma caixa de ferramentas denominada RivMAP, criada especificamente para a determinação da linha central de canais fluviais. A metodologia exige, entretanto, a utilização do software MATLAB (MathWorks), aumentando a complexidade da análise.

As sequências de imagens binárias e da linha central ao longo do período estudado foram utilizadas para criar vídeos que permitem uma melhor visualização da dinâmica espaço-temporal fluvial. Os vídeos criados estão disponíveis em https://www.youtube.com/channel/UCH5beX1_ExwkZEQzf0KYu2A.

Os trechos dos rios Camaquã e Taquari estudados apresentam uma transição do planalto para a planície, o que gera uma declividade maior nos trechos estudados. Ambos apresentam formação de meandros na porção que percorre a planície. Os solos predominantes nas zonas dos trechos de planície também são semelhantes. De acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2013), neossolos são solos jovens e sem um horizonte B diagnóstico. Neossolos flúvicos ocorrem em ambientes de várzeas, planícies fluviais e terraços aluvionares. Solos aluviais eutróficos são neossolos flúvicos de alta saturação por bases. Neossolos eutróficos apresentam potencial para uso agrícola, embora práticas conservacionistas sejam necessárias devido à forte suscetibilidade aos processos erosivos em encostas. O uso destes solos próximos aos cursos d'água deve ser restringido por constituir área de preservação de matas ciliares (EMBRAPA, 2017). O movimento dos meandros observado neste estudo pode ser associado ao potencial de erosão dos neossolos associado à declividade, que confere maior velocidade ao escoamento dos rios. Considerando o potencial para agricultura, é possível que mudanças no uso do solo ou alterações antrópicas diretas (tomada de água para irrigação, construção de barragens) tenham influenciado as alterações observadas.

O trecho selecionado do rio Purus é o mais longo, não apresenta grande declividade e apresenta a maior sinuosidade. Os solos predominantes em seu curso são gleissolos háplicos, que são solos constituídos por material mineral com horizonte glei iniciando dentro dos primeiros 150 centímetros da superfície, textura média ou argilosa e teores altos de alumínio, sódio e enxofre. Estes solos encontram-se permanente ou periodicamente saturados por água e geralmente situam-se nas partes mais baixas de planícies aluviais (EMBRAPA, 2017). Ao analisar a migração de outro rio da bacia hidrográfica do Amazonas, o Ucayali, Schwenk *et al.* (2016) atribuíram o fenômeno migratório daquele rio à carga de sedimentos advinda de tributários, à dimensão dos rios e à alta influência sazonal, embora o abandono do meandro por eles analisado tenha sido iniciado por ação antrópica. Estes fatores provavelmente também influenciam a migração do rio Purus.

O estudo da dinâmica espaço-temporal fluvial em séries temporais longas fornece subsídios para o melhor entendimento do comportamento dos rios. Sua associação a estudos de processos erosivos e de deposição de sedimentos ou a estudos de uso e ocupação do solo podem se tornar ferramentas importantes na gestão de bacias hidrográficas. Os três rios estudados sofrem pressões antropogênicas: desmatamento na bacia do rio Purus, agricultura nas bacias dos rios Camaquã e Taquari e mineração no rio Camaquã. A metodologia proposta pode auxiliar no estabelecimento de relações entre estas pressões e alterações no curso dos rios, embora este não tenha sido o enfoque do presente estudo.

8 CONCLUSÃO

Séries temporais de imagens obtidas a partir do sensoriamento remoto, como a *Landsat Collection*, permitem o melhor entendimento de fenômenos que ocorrem na superfície terrestre, por serem apresentarem grande resolução temporal e permitirem a análise de grandes extensões territoriais. Neste contexto, as ferramentas de sensoriamento remoto são essenciais na seleção, extração e análise das informações de interesse.

Este estudo propôs o uso de ferramentas disponíveis em softwares de sistemas de informação geográfica para a reconstrução da dinâmica espaço-temporal de trechos dos rios Camaquã, Purus e Taquari. Através destas ferramentas, foi possível desenvolver uma metodologia para reconstruir a migração lateral do canal fluvial dos trechos selecionados, ao longo de 34 anos. Todos os trechos dos rios selecionados apresentavam migrações laterais, e o rio Purus apresentou o abandono de um meandro. Alguns potenciais fatores condicionantes para estas alterações foram identificados, como tipo de solo e declividade. Entretanto, estudos mais aprofundados seriam necessários para estabelecer correlações entre as alterações e fatores condicionantes. A ocorrência de alterações antrópicas significativas durante o período também não foi avaliada.

Embora existam limitações ao uso desta metodologia, ela pode ser associada a outros estudos, como os de tendências de uso e ocupação do solo, para avaliar o impacto das alterações antrópicas nas bacias hidrográficas, ou auxiliar no planejamento da ocupação de áreas em planícies aluvionares.

REFERÊNCIAS

ALLEN, G.H.; PAVELSKY, T.M. Patterns of river width and surface area revealed by the satellite-derived North American River Width data set. **Geophysical Research Letters**, American Geophysical Union, v.42, p. 395 a 402, 2015, doi: 10.1002/2014GL062764.

ANA. **HidroWeb**. Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos, 2017. Disponível em: <<http://www.snirh.gov.br/hidroweb/>>. Acesso em: 25 set. 2017.

ASSINE, M.L.; PADOVANI, C.R.; ZACHARIAS, A.A.; ANGULO, 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, nº1, p. 97 a 108, 2005.

BAKI A.B.M.; GAN, T.Y. Riverbank migration and island dynamics of the braided Jamuna River of the Ganges-Brahmaputra basin using multi-temporal Landsat images. **Quaternary International**, v. 263, p. 148 a 161, 2012.

CARDOSO, A.H. **Hidráulica Fluvial**. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 314 p. 1998. ISBN 972-31-0815-1.

CGBHRC. **A Bacia Hidrográfica**. Comitê de Gerenciamento da Bacia Hidrográfica do Rio Camaquã. Disponível em: <<http://www.comitecamaqua.com/index.php/a-bacia-hidrografica/caracterizacao-geral>>. Acesso em: 02 nov. 2017.

CLARK LABS. **IDRISI The Selva Edition**, 2012.

COLLISCHONN, W.; TUCCI, C.E.M. **Aspectos da hidrologia da bacia do Alto Rio Taquari**. Rhama. Disponível em: <rhama.com.br/blog/wp-content/uploads/2017/01/hidroparaguai.pdf>. Acesso em: 25 set. 2017.

CPRM. **GeoSGB**. Geodiversidade, Base de dados, 2017. Disponível em: <http://geosgb.cprm.gov.br/geosgb/sobre_geosgb.html>. Acesso em: 10 dez. 2017.

EMBRAPA. **Mapa de Solos da Planície Pantaneira**. Embrapa Pantanal – CPAP, 2015.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3ª ed revista e ampliada, 353 p., 2013. Disponível em: < <https://www.embrapa.br/solos/sibcs/solos-do-brasil>>. Acesso em: 10 dez. 2017.

EMBRAPA. **Árvore do conhecimento: Solos Tropicais**. Agência Embrapa de Informação Tecnológica, 2017. Disponível em: < <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/>>. Acesso em: 10 dez. 2017.

ESRI. **ArcGIS 10.3 for Desktop**, 2014

ESRI. **World Hydro Basemap**. Hydro TeamRC, 2012. Disponível em: < <https://www.arcgis.com/home/item.html?id=e0b966561f41496386771fbaf621fd63>>. Acesso em: 04 dez. 2017.

GAMA. **Relatório Final Síntese**. Serviços de Consultoria Relativos ao Processo de Planejamento de Planejamento da Bacia Hidrográfica do Camaquã. Fases A, B e C. Secretaria do Ambiente e Desenvolvimento Sustentável, 209p, 2016.

GAO, B. NDWI – A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. **Remote Sensing of Environment**. V. 58, issue 3, p. 257 a 266, 1996.

GOOGLE. **Google Earth**, 2017. Disponível em: <<https://earth.google.com/web/@-10.48675923,-54.84859569,-220.27323065a,5007913.94107461d,35y,0h,0t,0r>>. Acesso em: 10 set. 2017.

GÜNERALP, I.; ABAD, J.D.; ZOLEZZI, G.; HOOKE, J. Advances and challenges in meandering channels research. **Geomorphology**, issues 163-164, p. 1 a 9, 2012.

GUPTA, N.; ATKINSON, P.M.; CARLING, P.A. Decadal length changes in the fluvial planform of the River Ganga: bringing a mega-river to life with Landsat archives.

Remote Sensing Letters, vol. 4, n° 1, p. 1 a 9, 2013.

HOSSAIN M.A.; GAN, T.Y.; BAKI, A.B.M. Assessing morphological changes of the Ganges River using satellite images. **Quaternary International**, v. 304, p. 142 a 155, 2013.

INPE. **Bacia do Rio Purus**. Disponível em:

<<http://sigma.cptec.inpe.br/purus/purus.html>>. Acesso em: 16 set. 2017.

KISS T.; BLANKA, T. River channel response to climate - and human – induced hydrological changes: Case study on the meandering Hernád River, Hungary.

Geomorphology, v. 175-176, p. 115 a 125, 2012.

MAURYA, S.P.; YADAV, A.K. Evaluation of course change detection of Ramganga river using remote sensing and GIS, India. **Weather and Climate Extremes**, v. 13, p. 68 a 72, 2016.

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 a 1432, 1996.

MUELLER, N.; LEWIS A.; ROBERTS, D.; RING, S.; MELROSE, R.; SIXSMITH, J.; LYMBURNER, L.; McINTYRE A.; TAN, P.; CURNOW, S.; IP A. Water observations from space: Mapping surface water from 25 years of Landsat imagery across Australia. **Remote Sensing of Environment**, v. 174, p. 341 a 352, 2016.

PETSCH, C.; MONTEIRO, J.B.; DAL SANTO, T. Análise das migrações do canal principal da bacia do rio Antas, noroeste do Paraná. **Anais do 9º Simpósio Nacional de Geomorfologia**, 3p. Rio de Janeiro, 2012. Disponível em:

<<http://www.sinageo.org.br/2012/trabalhos/2/2-181-45.html>>. Acesso em: 15 out. 2017.

RHOADS, B.L.; LEWIS, Q.W.; ANDERSEN, W. Historical changes in channel network extent and channel planform in an intensively managed landscape: Natural versus human-induced effects. **Geomorphology**, v. 252, p. 17 a 31, 2016.

SCHWENK, J.; KHANDELWAL, A.; FRATKIN, M.; KUMAR, V.; FOUFOULA-GEORGIU E. High spatiotemporal resolution of river planform dynamics from Landsat: The RivMAP toolbox and results from de Ucayali River. **Earth and Space Science**, American Geophysical Union, v. 4, p. 46 a 75, 2017, doi: 10.1002/2016EA000196.

SILVA, A.E.P.; ANGELIS, C.F.; MACHADO, L.A.T.; WAICHAMAN, A.V. Influência da precipitação na qualidade da água do Rio Purus. **Acta Amazônica**, v. 38, nº4, p. 733 a 742, 2008.

SOUSA JÚNIOR, W.C.; WAICHMAN, A.V.; JAIME, A.L.G.; SINISGALLI, P.A.A. Gestão das águas na Amazônia: a bacia do rio Purus. **Workshop Sobre Gestão Estratégica de Recursos Hídricos**, 4p., s.d. Disponível em: < https://www.researchgate.net/publication/266074171_GESTAO_DAS_AGUAS_NA_AMAZONIA_A_BACIA_DO_RIO_PURUS?enrichId=rgreq-6ff28ffc923cb2c5f5bae2ccea7d738b-XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWdlOzI2NjA3NDE3MTtBUzoyMjEwMzUwODY1MjAzMjBAMTQyOTcxMDI3OTQ5OA%3D%3D&el=1_x_3&_esc=publicationCoverPdf>. Acesso em: 14 set. 2017.

USGS. **EarthExplorer**, 2017. Disponível em: < <https://earthexplorer.usgs.gov/>>. Acesso em: 10 set. 2017.

USGS. **Landsat Thematic Mapper (TM) Level 1 (L1) data format control book (DFCB)**. Version 9.0. Landsat Mission Management Officer. Earth Resources Observation and Science Center, Sioux Falls, 53 p., 2016.

USGS. **Shuttle Radar Topography Mission (SRTS) 1 Arc-Second Global**. 2015. Disponível em: <<https://lta.cr.usgs.gov/SRTM1Arc>>. Acesso em: 10 dez 2017.

USGS 2017. **Landsat Collections**. Landsat Missions. Disponível em:
<<https://landsat.usgs.gov/landsat-collections>>. Acesso em: 04 nov. 2017.

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 a 3033, 2006. ISSN 1366-5901, doi: 10.1080/01431160600589179.

YANG, X.; DAMEN, M.C.J.; VAN ZUIDAM R.A.; Satellite remote sensing and GIS for the analysis of channel migration changes in the active Yellow River Delta, China. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v.1, issue 2, p. 146 a 157, 1999.

APÊNDICE A – DATA DE OBTENÇÃO E SATÉLITE FONTE DAS IMAGENS
LANDSAT UTILIZADAS NO ESTUDO.

(continua)

Camaquã		Purus		Taquari	
Satélite	Data	Satélite	Data	Satélite	Data
Landsat 4- 5	24/04/1984	Landsat 4- 5	02/08/1984	Landsat 4- 5	10/08/1984
	27/04/1985		22/09/1985		13/08/1985
	01/06/1986		08/08/1986		28/05/1986
	07/07/1987		26/07/1987		19/08/1987
	28/10/1988		13/08/1988		21/08/1988
	28/08/1989		16/08/1989		23/07/1989
	11/04/1990		19/08/1990		26/07/1990
	21/10/1991		22/08/1991		14/08/1991
	21/09/1992		25/09/1992		31/07/1992
	08/09/1993		26/07/1993		03/08/1993
	30/11/1994		29/07/1994		21/07/1994
	16/10/1995		14/06/1995		06/06/1995
	30/07/1996		04/09/1996		08/06/1996
	01/07/1997		09/10/1997		13/07/1997
	02/06/1998		08/07/1998		14/06/1998
	05/06/1999		15/10/1999		17/06/1999
	27/09/2000		30/08/2000		05/07/2000
	17/11/2001		18/09/2001		09/08/2001
	09/03/2002	Landsat 7	12/08/2002		05/03/2002
	20/09/2003	Landsat 4- 5	24/09/2003		30/07/2003
	06/09/2004		09/08/2004		17/08/2004
	04/05/2005		28/08/2005		04/08/2005
	08/06/2006		31/08/2006		07/08/2006
	26/05/2007		19/09/2007		09/07/2007
	03/10/2008		03/07/2008		29/09/2008
	28/03/2009		08/09/2009		28/06/2009
	02/06/2010		27/09/2010		15/06/2010
	28/10/2011		12/07/2011		22/09/2011

(conclusão)

Camaquã		Purus		Taquari	
Satélite	Data	Satélite	Data	Satélite	Data
Landsat 7	07/11/2012	Landsat 7	23/08/2012	Landsat 7	14/07/2012
Landsat 8	18/11/2013	Landsat 8	18/08/2013	Landsat 8	25/07/2013
	07/12/2014		21/08/2014		12/07/2014
	10/12/2015		09/09/2015		16/08/2015
	22/08/2016		09/07/2016		02/08/2016
	25/08/2017		28/07/2017		20/07/2017