

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

LUCIANO AUGUSTO MYSCZAK

ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DE FEIÇÕES FLUVIAIS PARA FINS DE
MAPEAMENTO DE DETALHE E CLASSIFICAÇÃO TAXONÔMICA DO
RELEVO

CURITIBA

2021

LUCIANO AUGUSTO MYSCZAK

ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DE FEIÇÕES FLUVIAIS PARA FINS DE
MAPEAMENTO DE DETALHE E CLASSIFICAÇÃO TAXONÔMICA DO
RELEVO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia, curso de Mestrado, Setor de Ciências da Terra da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Geografia.

Orientador: Eduardo Vedor de Paula

CURITIBA

2021

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP) UNIVERSIDADE
FEDERAL DO PARANÁ

SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Mysczak, Luciano Augusto

Análise e interpretação de feições fluviais para fins de mapeamento
de detalhe e classificação taxonômica do relevo. / Luciano Augusto
Mysczak. – Curitiba, 2021.

1 recurso on-line : PDF.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de
Ciências da Terra, Programa de Pós-Graduação em Geografia.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Vedor de Paula.

1. Geografia. 2. Litoral paranaense. 3. Mapeamento geomorfológico.
4. Relevo. I. Paula, Eduardo Vedor de. II. Universidade Federal do
Paraná. Programa de Pós-Graduação em Geografia. III. Título.

Bibliotecário: Nilson Carlos Vieira Junior CRB-9/1797



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO GEOGRAFIA -
40001016035P1

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação GEOGRAFIA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **LUCIANO AUGUSTO MYSCZAK** intitulada: **Análise e Interpretação de Feições Fluviais para fins de Mapeamento de Detalhe de Classificação Taxonômica do Relevo.**, sob orientação do Prof. Dr. EDUARDO VEDOR DE PAULA, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 16 de Dezembro de 2021.

Assinatura Eletrônica

17/12/2021 18:52:55.0

EDUARDO VEDOR DE PAULA

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

18/12/2021 17:28:39.0

JULIO MANOEL FRANÇA DA SILVA

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CENTRO-OESTE)

Assinatura Eletrônica

20/12/2021 08:36:57.0

ALEXANDRE BERNARDINO LOPES

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ - CEM)

Av. Cel. Francisco H dos Santos, 100 - Ed. João José Bigarella - 1º andar - sala 108 - CURITIBA - Paraná - Brasil

CEP 81531-980 - Tel: (41) 3361-3450 - E-mail: ufprposgeografia@gmail.com

Documento assinado eletronicamente de acordo com o disposto na legislação federal Decreto 8539 de 08 de outubro de 2015.

Gerado e autenticado pelo SIGA-UFPR, com a seguinte identificação única: 137150

Para autenticar este documento/assinatura, acesse <https://www.prppg.ufpr.br/siga/visitante/autenticacaoassinaturas.jsp>
e insira o código 137150

Dedico este trabalho à Juliana, minha esposa, que com todo seu amor e capacidade fez a diferença no desenvolvimento deste trabalho, nas reflexões e árduos levantamentos de campo.

AGRADECIMENTO

Ao Professor e Orientador Eduardo Vedor de Paula, pelas conversas e ensinamentos. Jamais esquecerei o apoio e a amizade tivemos nestes vários anos. Agradeço por ter me mostrado o caminho das pedras, bem como dos solos, águas, florestas e relevos. Obrigado principalmente por ter me ensinado a mapear estes caminhos.

Agradeço ao Professor Julio Manoel França da Silva por ter ajudado a reacender prazer pela docência e por ter feito importantes contribuições durante a qualificação.

Agradeço ao Professor Leonardo Ercolin Filho que, com a sinceridade necessária, apontou os problemas no método dos meus levantamentos topográficos e, com as habilidades de um excelente professor, me ensinou a melhorar a técnica e metodologia.

Não deixaria de agradecer às pessoas torceram por mim e pelos resultados da pesquisa. Agradeço, inclusive, os empurrões que levei, que não me derrubaram, mas me fizeram ir para frente.

Sou grato à Universidade pública brasileira, em especial da Universidade Federal do Paraná, da qual tenho um orgulho muito grande, bem como de seus funcionários comprometidos com o desenvolvimento da ciência e dos cientistas. Entretanto, desagrado fortemente o atual Presidente da República e os que compactuam de sua postura negacionista e anticiência.

Por último, mas não menos importante, agradeço à Juliana, minha esposa, que se demonstrou incansável nos difíceis levantamentos de campo, com coletas de dado: no mato e na água. Ela, sem deixar de lado seu Doutorado e desafios pessoais, me ajudou brilhantemente com raciocínios e constantes debates sobre a minha pesquisa. Com uma grande demonstração de amor e companheirismo, foi a pessoas que mais me deu apoio nos momentos difíceis (e como foram difíceis), me estimulou para não desistir e, ainda, apresentar o melhor de mim.

RESUMO

Sabe-se que em regiões de planície litorânea associadas às áreas serranas, especialmente em zonas tropicais e subtropicais, os processos geomorfológicos são naturalmente acentuados e potencializados pelos elevados índices pluviométricos. A bacia hidrográfica do rio Jacaré situado no litoral paranaense, teve em 2011 sua planície soterrada por sedimentos e detritos de movimentos de massa decorrentes dos mais intensos eventos pluviométricos até então registrados no estado do Paraná. Verifica-se que após obras de desassoreamento, retificação e dragagem do rio ocorrem constantes mudanças no leito e nas margens, expressando processos geomorfológicos acelerados. O mapeamento geomorfológico é um importante instrumento para estudo e compreensão das potencialidades e fragilidades da paisagem. Para tanto, comumente se ampara no Sensoriamento Remoto e nos Sistemas de Informação Geográfica. Entretanto, os elevados custos para obtenção e insuficiência da resolução espacial e temporal das imagens aéreas e orbitais limitam a capacidade de análise de feições geomorfológicas com alta resolução espacial e temporal. O emergente desenvolvimento técnico da informática, revolucionou as áreas do sensoriamento remoto e fotogrametria com a utilização de câmeras embarcadas em Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT). Este tema, apesar de crescente na literatura científica, apresenta ainda muitas lacunas metodológicas quanto à utilização de dados em altíssima resolução para análise da evolução da paisagem. A este contexto, soma-se ainda a carência de propostas de classificação e mapeamento das menores feições de relevo, como as fluviais. Tendo em vista as questões expostas, esta pesquisa tem por objetivo compreender como se dá a atuação dos processos geomorfológicos fluviais de detalhe no trecho de planície do rio Jacaré. Para tanto, apresenta-se também proposições metodológicas para o mapeamento e classificação taxonômica das feições fluviais e associa a utilização de topografia e fotogrametria com VANT para o monitoramento de processos fluviais atuais. Foi realizado o monitoramento das mudanças das feições fluviais com sucessivos levantamentos topográficos e imageamentos com VANT em 6 campanhas realizadas entre outubro de 2019 e janeiro de 2021. Foram produzidos 21 ortomosaicos com resolução espacial de 1,7 centímetros. Para o mapeamento geomorfológico, a partir de tal resolução espacial, foi elaborada uma chave de classificação de feições fluviais, permitindo distinguir 3 processos, 14 formas e 12 fatores de controle. Com a altíssima resolução espacial dos ortomosaicos, associada ao detalhamento da chave, foi possível representar na base cartográfica 52 feições na escala 1:80. A análise morfométrica expressou a alternância de processos dominantes e as mudanças na geometria das seções transversais associadas à variação das precipitações registradas. Por se tratar de uma localidade com riscos extremos, associados aos grandes volumes de precipitação, os resultados desta pesquisa apresentam potencial para aplicação no ordenamento territorial.

Palavras-chave: Mapeamento Geomorfológico. VANT. Feições Fluviais. Seções Transversais.

ABSTRACT

It is known that in coastal plain regions associated with mountainous areas, especially in tropical and subtropical areas, geomorphological processes are naturally accentuated and enhanced by high rainfall. In 2011, the Jacareí river basin located on the coast of Paraná had its plain buried by sediments and debris from mass movements resulting from the most intense rainfall events recorded so far in the state of Paraná. It appears that after works of desilting, rectification and dredging of the river, constant changes occur in the bed and banks, expressing accelerated geomorphological processes. Geomorphological mapping is an important tool for studying and understanding the potential and weaknesses of the landscape. Therefore, it is commonly supported by Remote Sensing and Geographic Information Systems. However, the high costs of obtaining and insufficient spatial and temporal resolution of aerial and orbital images limit the ability to analyze geomorphological features with high spatial and temporal resolution. The emerging technical development of information technology revolutionized the areas of remote sensing and photogrammetry with the use of cameras embedded in Unmanned Aerial Vehicles (UAV). This theme, despite growing in the scientific literature, still has many methodological gaps regarding the use of very high resolution data to analyze the evolution of the landscape. In addition to this context, there is also the lack of proposals for classification and mapping of the smallest relief features, such as fluvial ones. In view of the above issues, this research aims to understand how the detailed fluvial geomorphological processes work in the Jacareí River plain stretch. Therefore, it also presents methodological propositions for the mapping and taxonomic classification of river features and associates the use of topography and photogrammetry with UAV for monitoring current fluvial processes. Monitoring of changes in fluvial features was carried out with successive topographic surveys and UAV imaging between October 2019 and January 2021. Twenty-one orthomosaics were produced with a spatial resolution of 1.7 centimeters. For the geomorphological mapping, based on such spatial resolution, a classification key of fluvial features was elaborated, allowing to distinguish 3 processes, 14 forms and 12 control factors. With the very high spatial resolution of the orthomosaics, associated with the details of the key, it was possible to represent 52 features in the cartographic base in a 1:80 scale. The morphometric analysis expressed the alternation of dominant processes and the changes in the geometry of the cross sections associated with the variation in registered precipitation. Because it is a location with extreme risks, associated with large volumes of precipitation, the results of this research have potential for application in land use planning.

Keywords: Geomorphological Mapping. ADVANTAGE River Features. Cross Sections

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Dinâmica sedimentar fluvial	21
Figura 2 Trecho retificado do rio Macaé (1970). Acervo do Extinto DNOS	27
Figura 3 Classificação Taxonômica de Ross (1992).....	34
Figura 4 Padrões de Drenagem.	35
Figura 5 Classificação do padrão de canal fluvial.....	36
Figura 6 Variações no padrão de canais fluviais de acordo com o tipo de carga sedimentar predominante.....	36
Figura 7 Exemplos de Estereoscópio. A) Estereoscópio de bolso; B) Estereoscópio de Mesa.	40
Figura 8 Produtos fotogramétricos obtidos com VANT. A) Nuvem de pontos; B) Modelo Digital de Superfície; C) Ortomosaico	41
Figura 9 Levantamento de uma seção transversal com estação total. Local: Seção 03 do rio Jacareí. (Feito pelo Autor)	43
Figura 10 Localização da área de estudo	45
Figura 11 A) Médias históricas de precipitação, B) variabilidade sazonal de precipitação entre os anos 1986 e 2015. C) Destaque ao ano 2011 na variabilidade sazonal. Dados da estação 2548049 (ANA) na bacia hidrográfica do rio Santa Cruz. Organização: O autor. Fonte: Águas Paraná (2020).....	46
Figura 12 Fotografia aérea da área de estudo.....	49
Figura 13 Fluxograma metodológico.....	50
Figura 14 Mapa da Localização das áreas monitoradas com VANT e estação total na planície do rio Jacareí.....	53
Figura 15 Marco geodésico preexistente na seção 03.	54
Figura 16 Padrão de marco utilizado. A) Modelo de marco indicado pelo manual (INCRA, 2013). B) Foto de marco implantado na área (O autor, 2020)	54
Figura 17 Instrumentos para alinhamentos dos levantamentos. A) Guia graduada a cada 30 centímetros para indicação do posicionamento do prisma. B) Ponto de Ancoragem para o cabo-guia dos levantamentos topográfico.....	55
Figura 18 Antena receptora do GNSS sendo utilizada na seção 04	55
Figura 19 Levantamento topográfico de seção transversal, seção 04	57
Figura 20 Etapas para aquisição de imagens de alta resolução com VANT	60
Figura 21 Croqui da direção de plano de voo.	62
Figura 22 Modelagem tridimensional produzida a partir das imagens do VANT.....	62
Figura 23 Distribuição dos planos de voo sobre a planície da bacia do rio Jacareí.....	64
Figura 24 Localização das Estações Meteorológicas	65
Figura 25 Estrutura básica da chave classificatória para paisagens fluviais.....	67
Figura 26 Amostras de feições identificadas por VANT.	70
Figura 27 Produtos fotogramétricos do VANT	72
Figura 28 Ortomosaico produzido com as imagens do VANT para o mapeamento geomorfológico e aplicação da chave classificatória de paisagens fluviais	73

Figura 29 Mapeamento Geomorfológico de detalhe da seção 01 nos meses de outubro de 2019 e janeiro de 2020	75
Figura 30 Mapeamento Geomorfológico de detalhe da seção 01 nos meses de março e novembro de 2020.....	76
Figura 31 Mapeamento Geomorfológico de detalhe da seção 01 nos meses de novembro de 2020 a janeiro de 2021.....	77
Figura 32 Mapeamento Geomorfológico de detalhe da seção 02 nos meses de outubro de 2019 e janeiro de 2020	78
Figura 33 Mapeamento Geomorfológico de detalhe da seção 02 nos meses de março e junho de 2020.....	79
Figura 34 Mapeamento Geomorfológico de detalhe da seção 02 nos meses de novembro de 2020 e janeiro de 2021.....	80
Figura 35 Mapeamento Geomorfológico de detalhe da seção 03 nos meses de outubro de 2019 a janeiro de 2020	81
Figura 36 Mapeamento Geomorfológico de detalhe da seção 03 nos meses de janeiro e março de 2020.....	82
Figura 37 Mapeamento Geomorfológico de detalhe da seção 03 nos meses de março de 2020 e janeiro de 2021	83
Figura 38 Mapeamento Geomorfológico de detalhe da seção 04 nos meses de outubro de 2019 e janeiro de 2020.....	84
Figura 39 Mapeamento Geomorfológico de detalhe da seção 04 nos meses de março e junho de 2020.....	85
Figura 40 Mapeamento Geomorfológico de detalhe da seção 04 nos meses de novembro de 2020 e janeiro de 2021	86
Figura 41 Imageamento fotogramétrico longitudinal sobre o rio Jacaréí na planície em 04/07/2020	89
Figura 42 Imageamento fotogramétrico longitudinal sobre o rio Jacaréí na planície em 12/10/2019	90
Figura 43 Imageamento fotogramétrico longitudinal sobre o rio Jacaréí na planície em 09/02/2020	91
Figura 44 Precipitação mensal e média histórica	92
Figura 45 precipitação diária em fevereiro de 2020	93
Figura 46 Área de amostragem - seção 01. A) Vista aérea; B) Vista de solo	94
Figura 47 A) Margem esquerda; B) Leito; C) Margem Direita	95
Figura 48 Resumo da análise da geometria hidráulica da seção 01. Onde L1-L6 correspondem aos levantamentos realizados.....	96
Figura 49 Área de amostragem - seção 02. A) Vista aérea; B) Vista de solo	99
Figura 50 Resumo da análise da geometria hidráulica da seção 02. Onde L1-L6 correspondem aos levantamentos realizados.....	100
Figura 51 Área de amostragem - seção 03. A) Vista aérea; B) Vista de solo	102

Figura 52 Impacto das chuvas na área amostral 3. A) Imagem aérea em 12 outubro de 2019. B) Imagem aérea em 09 fevereiro de 2020.	102
Figura 53 Resumo da análise da geometria hidráulica da seção 03. Onde L1, L2 e L3 correspondem aos levantamentos realizados.....	104
Figura 54 A) Planicidade da área próxima à seção 04 e Rodovia BR277; B) Drega em operação na proximidade da seção 04	106
Figura 55 Área monitorada - seção 04. A) Vista aérea; B) Vista de solo	106
Figura 56 Resumo da análise da geometria hidráulica da seção 04. Onde L1-L2 correspondem aos levantamentos realizados.....	107
Figura 57 Identificação de feição meândrica abandonada pelo rio Jacareí, em decorrência de obras de retificação do canal principal	110

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Caracterização pluviométrica	92
---	----

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 Resumo da classificação taxonômica	33
Quadro 2 Classificação das feições fluviais proposta por Riccomini et al. (2009)	37
Quadro 3 Cronograma das campanhas de campo	52
Quadro 4 Relação dos pontos e coordenadas rastreadas e associação com a orientação dos levantamentos topográficos.	56
Quadro 5 Exemplo de obtenção dos índices em um perfil transversal hipotético.	59
Quadro 6 Parâmetros de voo e dos produtos fotogramétricos.	61
Quadro 7 Parâmetros de voo longitudinal.....	63
Quadro 8 Termos classificatórios para as feições fluviais	69

LISTA DE ABREVIATURAS

APP	-	Área de Preservação Permanente
ET	-	Estação Total
GCP	-	Ground Control Points
GLONASS	-	Globalnaya Navigatsionnaya a Sputnikovaya Sistema.
GNSS	-	Global Navigation Satellite System
GPS	-	Global Position System
INMET	-	Instituto Nacional de Meteorologia
MDE	-	Modelo Digital de Elevação
MDS	-	Modelo Digital de Superfície
MDT	-	Modelo Digital de Terreno
PPP		Posicionamento por Ponto Preciso
SFM	-	Struction From Motion
TIN	-	Triangulated Irregular Network
VANT	-	Veículo Aéreo Não Tripulado

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1 Objetivos	19
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1 A Geomorfologia Fluvial	19
2.1.1 Dinâmica sedimentar fluvial	21
2.1.2 Alterações na dinâmica dos sistemas hídricos decorrentes de intervenções antrópicas	25
2.1.3 Planejamento Ambiental	29
2.2 Análise do relevo e mapeamento geomorfológico	30
2.2.1 Escala na análise geomorfológica	31
2.2.2 Classificação do relevo	32
2.2.3 Fotogrametria com VANT para mapeamento geomorfológico	38
2.2.4 Geometria hidráulica e análise de seção transversal	41
3. DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	45
4. MÉTODOS E PROCEDIMENTOS	50
4.1 Proposições para mapeamento geomorfológico fluvial de detalhe	51
4.2 Monitoramento e Análise dos Processos Geomorfológicos Fluviais	52
4.2.1 Alocação das seções transversais	53
4.2.2 Monitoramento das seções transversais	56
4.2.3 Análise da geometria das seções	58
4.2.4 Fotogrametria com VANT	60
4.2.5 Precipitação	64
5. RESULTADOS	66
5.1 Proposições para mapeamento geomorfológico fluvial de detalhe	66
5.1.1 Chave de classificação	66
5.1.2 Mapeamento das feições fluviais	71
5.2 Monitoramento e Análise dos Processos Geomorfológicos Fluviais	88
5.2.1 Precipitação	92
5.2.2 Seção Transversal 01	94
5.2.3 Seção Transversal 02	98
5.2.4 Seção Transversal 03	101
5.2.5 Seção Transversal 04	105

6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	111
7.	REFERÊNCIAS	114
	ANEXO	123

1. INTRODUÇÃO

As formas do relevo correspondem ao resultado da interação entre os processos endogenéticos e exogenéticos na crosta terrestre. A esculturação das formas, no entanto, se dá pela ação de acreção ou remoção de material descrito através dos processos erosivos e deposicionais. Tais processos atuam na construção e evolução dos ambientes fluviais, onde mudanças espaciais e temporais ocorrem em intervalos variados de tempo (MARÇAL, 2013), sendo condicionados pelo regime de escoamento, o qual varia especialmente em função da precipitação, da topografia e das características do uso e cobertura da terra (CHRISTOFOLETTI, 1981; LEOPOLD, 1996).

Com o transporte dos materiais intemperizados das áreas mais elevadas para as mais baixas e dos continentes para o mar, os rios se constituem como os mais importantes agentes geomorfológicos de mudanças do relevo (CHRISTOFOLETTI, 1980), alterando seu leito e curso através do escoamento de água e sedimentos (BINDER, 2001). A dinâmica fluvial é fortemente condicionada por fatores climáticos, notadamente representados pela precipitação. Durante eventos extremos, a vazão e a energia potencial necessária para mover materiais particulados ao longo das vertentes e do canal aumentam, ocasionando erosão a montante e deposição de materiais a jusante (STEAVAUX e LATRUBESSE, 2017). Durante estes eventos o rio pode apresentar substanciais mudanças em seu leito, alterando, inclusive, seu próprio curso. Em condições climáticas dentro da média histórica, os rios mantem seu equilíbrio dinâmico e a largura do canal se mantém estável (CUNHA, 1994).

Os processos geomorfológicos em um sistema fluvial podem ocorrer em diferentes escalas temporais e espaciais. Neste sentido, alterações no relevo podem se dar ao longo de alguns segundos ou milhões de anos, em áreas que vão desde centímetros até milhares de quilômetros. Por esta razão, um rio pode ser estudado em seus processos locais e efêmeros ou regionais e duradouros. Trata-se, portanto, da ideia fundamental da geomorfologia moderna, onde se compreende o relevo a partir das noções de escala espaço-temporal, magnitude e frequência (STEAVAUX e LATRUBESSE, 2017).

Tais processos são controlados pela ação climática, atividades biológicas e ação antrópica (MARQUES, 1998). Nas regiões tropicais, onde o intemperismo é acelerado, o transporte de sedimentos é potencializado pelos elevados índices pluviométricos (MAUHE, 2006 e ANGULO et al., 2006), especialmente quando há a associação entre planícies litorâneas e regiões serranas (MARÇAL, 2013).

Como exemplo de tal associação, destaca-se a planície do litoral paranaense adjunta à Serra do Mar, onde os processos geomorfológicos atuantes são naturalmente acentuados pelas características climáticas, geológicas e pedológicas (CURCIO et al., 1998; ODRISK et al., 2003 e PAULA et al., 2010). As altitudes elevadas e a curta distância existente entre o primeiro planalto e o nível do mar conferem aos rios das bacias litorâneas paranaenses um alto potencial erosivo, frequentes inundações, bem como carreamento de grande quantidade de sedimentos para as planícies, leitos dos rios e para o estuário (ANGULO, 1992; ANGULO et al., 2006,

RUTYNA et al., 2021). Destaca-se na Serra do Mar paranaense a bacia hidrográfica do rio Jacareí, que, em decorrência de um intenso evento pluviométrico ocorrido em março de 2011 (+ de 500 milímetros acumulados em 72 horas), teve seus cursos d'água e planície soterrados por sedimentos e detritos de movimentos de massa. Um dos resultados decorrentes do evento foi o rearranjo da dinâmica fluvial e o surgimento de novas áreas de inundação (SILVEIRA, et al., 2012).

Decorridos alguns meses desde o evento foram executadas obras de desassoreamento e retificação em alguns rios da região, incluindo o rio Jacareí. Verifica-se, no entanto, que os processos geomorfológicos atuantes na bacia, incluindo atividade antrópica e condições ambientais, resultam em rápidas mudanças nos trechos sujeitos às obras, tais como erosão, migração de margens e assoreamento do leito. Aventa-se, portanto, à processos geomorfológicos bastante acelerados, onde as referidas obras apresentam tempo de efetividade reduzido. Aspectos similares foram discutidos e evidenciados por Cunha (2012) e Assumpção e Marçal (2012) em obras de retificação realizadas em rios da planície litorânea do estado do Rio de Janeiro.

Segundo Peloggia (1998) e Luz e Marçal (2016), ações antrópicas na paisagem podem promover alterações irreversíveis na topografia, na estrutura dos solos e nos sistemas hidrológicos. De acordo com Julien (1994), Cunha (2012) e Assumpção e Marçal (2012), atividades antrópicas exercem profundas influências sobre dinâmica hídrica, onde manejos equivocados costumam culminar em problemas ambientais, sociais e econômicos. A conjunção de tais fatores com a dinâmica geomorfológica das regiões litorâneas, segundo Muehe (2006), resulta em um cenário complexo, onde os interesses dos campos econômico e ambiental divergem entre si.

As formas e processos geomorfológicos de ambientes fluviais têm sido destacados como componentes essenciais na análise, planejamento e gestão do território (BELLETTI et al., 2017). Neste sentido, a ciência geomorfológica representa um componente efetivo para a análise da dinâmica de formas e processos e para o gerenciamento de recursos hídricos (CHISTOFOLETTI, 1980; CUNHA, 2012).

Christofoletti (2013) destaca que a geomorfologia se ocupa da análise das formas de relevo, focalizando em suas características, processos e fatores controladores, bem como em sua dinâmica evolutiva. Gregory (1985) corrobora que a investigação sobre as mudanças geomorfológicas deve envolver o estabelecimento de respostas às características das distribuições fixas das barreiras à mudança e das forças de mudança, utilizando aferições dos estudos de processos contemporâneos. Ou seja, é essencial ter como base que a compreensão do presente é a chave para a compreensão do passado (HUTTON, 1726-1797).

Ab'Saber (2001; 2003) argumenta que “há que se conhecer e compreender as potencialidades e fragilidades dos domínios paisagísticos para saber como utilizados e ordená-los”. Embora o estudo do passado possa ser útil para uma tentativa de prever o futuro, é também imprescindível que a investigação dos processos atuais seja feita de forma a auxiliar a compreensão da dinâmica do ambiente (GREGORY, 1985).

Um importante instrumento para estudo e compreensão de tais dinâmicas é o mapeamento dos processos e feições fluviais, o qual pode se dar com o apoio da fotogrametria, de imagens aéreas, de imagens orbitais e dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG) (CHRISTOFOLLETTI, 1981; ASSUMPÇÃO e MARÇAL, 2012). De acordo com Kohler (2002), o emprego da grande escala na observação de fenômenos geomorfológicos permite o mapeamento de pequenas feições e processos atuais. Para tanto, feições e processos podem ser estudados a partir da geometria hidráulica, utilizando-se equipamentos de topografia, tais como réguas, nível e estação total (GREGORY e PARK, 1974; MORISAWA, 1985; FERGUSON, 1986; WILLIAMS et al., 2002; GRISON e KOBIYAMA, 2011).

A análise de processos e mudanças em feições geomorfológicas é importante para prever a capacidade de ajuste do relevo e o tempo de evolução da paisagem, como deslocamentos de falhas geológicas (GAO et al., 2017), evolução de processo erosivos das vertentes e encostas (ANGULO, 2006), mudanças na forma (BRIERLEY et al., 2019), e geometria dos rios (GRISON e KOBIYAMA, 2011, MARÇAL, 2013) e feições fluviais (HASS et al., 2020, STEAVAUX e LATRUBESSE, 2017).

A análise destas mudanças depende da coleta e levantamento de dados geomorfológicos e, que se referem à obtenção de valores que representem as características físicas do relevo, retratando sua composição, estrutura e dimensões das formas. Nos últimos anos, o desenvolvimento tecnológico revolucionou a capacidade e o aprimoramento da coleta de dados, o que permite fornecer respostas mais detalhadas sobre a dinâmica geomorfológica da superfície terrestre (VILES, 2016; RODRIGUES et al., 2020).

Dentre a gama de tecnologias atualmente disponíveis, destacam-se o sensoriamento remoto, a datação radiométrica, técnicas geofísicas, análises de campo e laboratoriais (PIEGAY et al., 2015). Ressalta-se que a coleta de dados pode ser pontual ou sistemática. Monitoramentos podem variar de dias a vários anos. A exemplo, as análises das mudanças na calha fluvial de rios apresentadas por Vieira e Cunha (2001) Cunha (2012) e Marçal (2013) que resultam de 4 anos de coleta de dados. Fernandez (2001) e Binda e Fernandez (2011) analisam, por sua vez, resultados obtidos em até 15 meses.

No campo das ciências geomorfológicas, a análise geomorfométrica se dá principalmente com utilização do mapeamento geomorfológico, em interdisciplinaridade com áreas como matemática, física, geologia, biologia e informática (VILES, 2016; CARRIVICK e SMITH, 2018). Diversos trabalhos se voltam ao mapeamento geomorfológico, para os quais empregam-se métodos distintos, que variam conforme objetivos, áreas mapeadas e tempo de pesquisa.

Análises geomorfológicas podem ser utilizadas para classificações gerais e amplas, como a proposta de classificação do relevo elaborada por Ross (1985; 1992) que contempla desde as macroestruturas até as menores feições do relevo e processos atuantes, distinguindo-os em seis níveis hierárquicos. Esta proposta, no entanto, em função das limitações tecnológicas do tempo que foi elaborada, apresenta insuficiências no quinto e sexto nível taxonômico no que

tange ao mapeamento das microfeições do relevo, como as feições fluviais, que representam os processos atuais do relevo (ROSS, 1992).

No que se refere ao mapeamento geomorfológico de feições fluviais ocorrentes nos rios brasileiros, Stevaux e Latrubesse (2017) sinalizam que existem poucas propostas que contribuam na classificação de tal escala do relevo. Destacam-se os trabalhos de Riccomini et al., (2009), Silva e Santos (2015), Carrivick e Smith (2018) e Brierley et al., (2019), que buscam oferecer proposições para a classificação e análise de feições fluviais atuais.

Stevaux e Latrubesse (2017) apontam que geomorfologia fluvial brasileira ainda carece de abordagens sobre a metamorfose e evolução fluvial resultante da influência antrópica. Para Silva (2010) e para Silva e Santos (2015), existem lacunas teóricas, técnicas e metodológicas na obtenção de dados de alta resolução que permitam a identificação de microfeições e processos ocorrentes. Desta forma, perfazem-se as tendências dos estudos geomorfológicos atuais, como: a busca pela obtenção mais eficaz e sistemática dos dados geomorfológicos; análise geomorfológica segundo a perspectiva ambiental e antropogênica; integração com outras áreas da ciência; e o reconhecimento das formas de detalhes na paisagem, como depósitos tecnogênicos e feições em depósitos fluviais (SILVA, 2010; VILES, 2016; GAO et al., 2017).

No sentido da obtenção e processamento de dados, o emergente desenvolvimento técnico da informática, revolucionou as áreas do sensoriamento remoto e da fotogrametria com a utilização de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT) e novos algoritmos baseados em nuvem de pontos, como *Struction From Motion* (SfM) (VILES, 2016; CARRIVICK e SMITH, 2018) para geração de modelos digitais de superfície com resolução decimétrica muito superior aos produtos dos satélites convencionais (CHANDLER et al., 2018; GAO et al., 2017; e PEDREIRA et al., 2020). Entretanto, a caracterização geomorfológica fluvial ainda carece de formas consagradas de classificação do relevo que compreenda a dinâmica espaço temporal corrente, com uma estrutura bem definida e terminologias adequadas (BELLETTI et al., 2017). Verifica-se, portanto, que as atuais propostas de classificação do relevo, mais utilizadas para o mapeamento geomorfológico, não são compatíveis com diversidade de microfeições detectadas nas imagens de VANT.

Neste sentido, Belletti et al. (2017) argumentam ser necessária elaboração de um novo sistema de levantamento e caracterização geomorfológica fluvial compatível com estruturas geomorfológicas dominantes. Silva e Santos (2015) evidenciam que o estabelecimento de métodos capazes de compatibilizar escalas, simbologias e legendas classificatórias para a representação geomorfológica de detalhe é um tema amplamente discutido por geomorfólogos desde o ano de 1958, em um congresso promovido pela União Geográfica Internacional (UGI). Todavia, esta questão passou a ter novos delineamentos no ano de 2019, a partir do 18º Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada, onde foram compostos grupos de trabalho com objetivo de construir as primeiras aproximações de um Sistema Brasileiro de Classificação do Relevo (SiBCR), no âmbito do qual se pretende seguir com os padrões taxonômicos, aos moldes

do já consagrado Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS, 2018) (BOTELHO e PELECH, 2019).

No contexto do planejamento do território fazem-se necessárias análises dos processos geomorfológicos atuantes, que permitam compreender como ocorrem as mudanças topográficas associadas à dinâmica fluvial. Marques (1998) aponta que compreender como surgem e evoluem as formas de relevo, permite o conhecimento sobre o que são e o que representam em diferentes escalas espaciais e temporais. A aplicação de investimentos em drenagem deve estabelecer prioridades baseadas no potencial de recuperação de cada estilo fluvial (BRIERLEY et al., 2002), isto é, na análise da capacidade da modificação do leito e margens de um determinado rio.

Tendo em vista, portanto, a demanda por informações sobre a dinâmica geomorfológica atual de rios litorâneos, lacunas teóricas e metodológicas sobre classificação taxonômica de pequenas feições fluviais e a emergência de recursos tecnológicos que permitem a obtenção de dados em alta resolução espacial e temporal, esta pesquisa se propõe a responder a seguinte questão: como se dá a atuação dos processos geomorfológicos fluviais de detalhe no trecho de planície litorânea do rio Jacareí?

Sabe-se que nem todos os rios apresentam a mesma forma e extensão de ajuste em resposta às perturbações (RUTHERFURD, 2000). A presente pesquisa é uma oportunidade para avaliar a resposta geomorfológica à eventos de baixa, moderada e alta energia. Neste sentido, há um interesse estratégico na escolha da área de estudo, pois ela concentra uma gama de importantes características que influem no contexto da dinâmica hídrica litorânea. A primeira característica relevante diz respeito a sua representatividade no contexto da Serra do Mar no que tange à sua suscetibilidade a movimentos de massa. Fato este fica evidenciado no do evento registrado em 2011, colocando-a também como um importante contribuinte no processo de assoreamento do CEP (Complexo Estuarino de Paranaguá).

Em face das potencialidades de contribuições na temática da dinâmica de processos sedimentares que afetam a dragagem portuária do Complexo Estuarino de Paranaguá, esta pesquisa integra o Projeto registrado no CNPQ sob número 455274/2014-2 (MCTI/CNPQ/Universal 14/2014), intitulado Estimativa da Produção de Sedimentos na Área de Drenagem do Complexo Estuarino de Paranaguá/PR: subsídios à gestão costeira. Havendo a possibilidade de novas intervenções com dragagem e retificação no rio Jacareí (PARANÁ, 2017), interessa também corroborar à discussão acerca de intervenções em rios de planície litorânea.

Tendo em vista importância dos estudos dos processos geomorfológicos fluviais para o planejamento do uso e ocupação do espaço, esta pesquisa apresenta contribuições à revisão dos Planos Diretores dos municípios de Morretes e Paranaguá, bem como às discussões no âmbito do Termo de Ajustamento de Conduta (TAC) firmado entre estes municípios e o Ministério Público do Estado do Paraná, visando mitigar riscos atrelados a eventos extremos, tal como o ocorrido em março de 2011.

1.1 Objetivos

Com base nas questões apresentadas, a presente pesquisa tem como objetivo geral compreender como se dá a atuação dos processos geomorfológicos fluviais de detalhe no trecho de planície litorânea do rio Jacaréí.

De maneira específica, objetiva-se:

- 1) Apresentar proposições metodológicas para o mapeamento e classificação taxonômica das feições fluviais;
- 2) Associar a utilização de topografia e fotogrametria com VANT, para o monitoramento de processos fluviais atuais no rio Jacaréí.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Esta seção do trabalho apresenta e discute o embasamento teórico utilizado para o desenvolvimento da presente pesquisa. Inicialmente é feita uma explanação sobre o contexto atual da geomorfologia fluvial, abordando atuais tendências, como: análise detalhada das menores feições do relevo, aprimoramento da eficácia na obtenção de dados geomorfológicos e emprego da perspectiva antropogênica (SILVA, 2010; MARÇAL, 2013 e PELOGGIA, 1998; VILES, 2016; CARRIVICK e SMITH, 2018).

Nesta seção discutem-se também fundamentos específicos para a compreensão da pesquisa. Desenvolveu-se uma discussão sobre a dinâmica sedimentar e morfométricas para embasar a compreensão do funcionamento natural dos processos físicos em sistemas geomorfológicos associados ao ambiente fluvial. Em seguida, discute-se a relação da sociedade com os rios e as alterações na dinâmica dos sistemas hídricos decorrentes de intervenções antrópicas, bem como a importância dos estudos geomorfológicos aplicados e do planejamento ambiental para a gestão adequada dos rios e do território.

No segundo subcapítulo, discorre-se sobre os recursos e técnicas para análise do relevo. A fim de abordar as lacunas metodológicas da classificação do relevo, é realizada uma explanação sobre as diferentes abordagens, desde a geral, como a taxonômica, até as mais específicas, como a classificação de feições fluviais. Em seguida, há uma explanação sobre o uso do conceito de Geometria Hidráulica como técnica de análise de processos fluviais atuais no relevo. Por fim, discute-se sobre potencialidades e outras considerações do uso de VANT para análise e mapeamento do relevo.

2.1 A Geomorfologia Fluvial

Estudos relacionados aos processos e formas de relevo que ocorrem em associação direta com o escoamento dos rios são de interesse especial da Geomorfologia Fluvial (CHRISTOFOLETTI, 1981). Esta, segundo Salgado et al. (2008) e Cunha (2013), representa um tema de destaque entre as produções científicas na área da ciência geomorfológica brasileira. Stevaux e Latrubesse (2017) explicam que se trata de uma ciência síntese, cujas bases vêm da

Geologia, Geografia, Hidrologia, Engenharia e Hidráulica, relacionando-se ainda com outras áreas do conhecimento, tais como Ecologia, Biologia, História, Sociologia, Química e Física.

A Geomorfologia Fluvial permite a representação realista das formas e processos, integrando-as com teorias biológicas e ecológicas, útil para a compreensão de vínculos entre as condições físicas do rio e sua biologia (BELLETTI et al., 2017).

No que tange ao entendimento sobre a dinâmica de processos e formas fluviais, destacam-se os clássicos trabalhos de Leopold e Maddock (1953), Leopold (1996) e Gregory e Park (1974). No âmbito nacional, os expoentes são Suguio (1973), Bigarella et al. (1979) e Christofolleti (1981), que apresentam descrições e análises de processos que atuam na morfogênese do relevo, contribuindo para a ciência de base e alicerçando o desenvolvimento da Geomorfologia Fluvial em rios tropicais e subtropicais.

Steavaux e Latrubesse (2017) apontam que tais referências, ainda que fundamentais, não abordam temas importantes como a metamorfose fluvial resultante da influência antrópica e carecem de uma perspectiva sistêmica da geomorfologia fluvial. Considerar a capacidade de ajuste, isto é, as modificações que ocorrem na forma do leito e das margens de um rio, permite uma discussão acerca da avaliação das obras no sistema fluvial (ASSUMPÇÃO e MARÇAL, 2012; PEREIRA et al., 2020). Neste contexto, a geomorfologia fornece um ponto de partida ideal para avaliar a interação de processos biofísicos dentro de uma bacia, pois os processos geomorfológicos determinam a dinâmica do sistema fluvial (BRIERLEY et al., 2002; BELLET et al., 2017).

As formas do relevo constituídas por depósitos sedimentares fluviais são, portanto, o objeto de estudo da Geomorfologia Fluvial. Cabe a ela o estudo dos processos atuantes responsáveis pela criação, preservação ou modificação das formas de relevo (STEAVAUX e LATRUBESSE, 2017). Assim, compreender como surgem e evoluem as formas de relevo, permite o conhecimento sobre o que são e o que representam em diferentes escalas espaciais e temporais (MARQUES, 1998), bem como analisar a representatividade dos pequenos processos e microfeições geomorfológicas – objeto desta pesquisa - para o desenvolvimento da paisagem.

Atualmente, a busca pela obtenção mais eficaz e sistemática dos dados geomorfológicos; análise geomorfológica segundo a perspectiva ambiental e antropogênica; integração com outras áreas da ciência; e a tendência de reconhecimento das formas de detalhes na paisagem, como depósitos tecnogênicos e feições em depósitos fluviais, são temas que permeiam grande quantidade das publicações recentes (VILES, 2016; GAO et al., 2017; CARRIVICK e SMITH, 2018; HASS et al., 2020)

A evolução da morfologia do canal fluvial na planície do rio Jacaréí compreende um tema central desta pesquisa. Desperta, portanto, especial interesse nos processos e formas em detalhe, decorrentes da dinâmica sedimentar fluvial atual, associada a interferências antrópicas.

2.1.1 Dinâmica sedimentar fluvial

Tendo em vista o profuso arranjo dos sistemas de drenagem da superfície terrestre, os rios constituem os mais importantes agentes geomorfológicos de transporte dos materiais intemperizados das áreas mais elevadas para as mais baixas e dos continentes para o mar (CHRISTOFOLETTI, 1981; LEOPOLD, 1996). Para Stevaux e Latrubesse (2017), o processo fluvial desempenhado pelos rios é o mais eficaz dos agentes denudacionais. Por onde passam, transformam as formas de relevo, nutrem o ambiente e seres vivos (BOTELHO, 2011). A movimentação da água é fundamental ao desenvolvimento dos processos físicos e biológicos no ambiente terrestre, dá origem aos solos, suporta a vegetação e propicia formação de habitats aquáticos (CHRISTOFOLETTI, 1981; CUNHA, 2013; BELLETTI et al., 2017).

Os sedimentos continentais procedem das porções mais altas do relevo, cujos principais contribuintes são as áreas de encostas, terraços e várzeas. Durante o processo de escoamento fluvial, as margens e o fundo do leito dos canais são também importantes disponibilizadores de material (CHRISTOFOLETTI, 1981; STEVAUX e LATRUBESSE, 2017).

Os rios possuem a capacidade natural de alterar seu curso através do regime de escoamento d'água e sedimentos. Essas alterações se manifestam, especialmente, pelos processos erosivos e deposicionais no canal principal e na planície de inundação (BINDER, 2001). Os meandros e curvaturas de um canal se constituem como componentes da área ativa dos rios, tanto para o regime hidrológico quanto para o transporte e disponibilização de sedimentos (SMITH et al., 2008). Eles são delineados de acordo com o relevo e sofrem alterações de forma e posicionamento de acordo com a dinâmica natural do corpo hídrico. Sofrem erosão em suas áreas côncavas e deposição nas áreas convexas. Quando há equilíbrio, a largura do canal se mantém estável. A formação de bancos deposicionais, bem como escombros e vegetação, favorece a diminuição da velocidade de escoamento das águas e a formação habitats aquáticos (CUNHA, 2013, BELLETTI et al., 2017).

O intemperismo é responsável pela produção e disponibilização de partículas a serem carregadas pelos rios. A gênese desse processo pode ser classificada como intemperismo químico quando ocorre a decomposição e dissolução das rochas, e físico quando ocorre a desagregação física das partículas (CHRISTOFOLETTI, 1981).

Segundo Christofolletti (1981) e Stevaux e Latrubesse (2017), o material carregado pelos rios pode encontrar-se na forma de carga dissolvida, em suspensão e de fundo (Figura 1).



Figura 1 Dinâmica sedimentar fluvial
(Organização: o autor, 2021)

A carga dissolvida e carga em suspensão constituem a carga total em suspensão. A primeira é composta por substâncias orgânicas e inorgânicas como coloides. A segunda, por sua vez, é composta por partículas geralmente menores que a areia fina, como argila e silte. Tais materiais são carregados por suspensão a uma velocidade muito próxima a do fluxo, caracterizando a turbidez d'água (STEVAUX e LATRUBESSE, 2017).

Como carga de fundo, entende-se: material particulado, maior e mais denso que o da carga suspensa, constituído de areias e seixos, transportada no fundo do canal por arraste, rolamento ou saltação. Em situações episódicas, como eventos pluviométricos, a carga de fundo tende a se tornar carga suspensa devido ao aumento da força de arrasto da água (STEVAUX e LATRUBESSE, 2017).

O movimento dessas partículas é determinado pela força de levantamento que é gerada pela diferença de velocidade entre o topo e a base do grão, criando uma pressão diferencial ascendente que tende a empurrar a partícula para cima. Isto é, o movimento de uma partícula é dado pela relação de cisalhamento no fundo do canal e o peso específico da partícula imersa (STEVAUX e LATRUBESSE, 2017).

Os processos fluviais de transporte e sedimentação ocorrem pela rede de drenagem, no trajeto dos rios, onde uma partícula pode ser sedimentada ou removida várias vezes. A continuidade alternada dos processos de erosão e sedimentação promove a transferência do material intemperizado para as bacias deposicionais lacustres ou marinhas (STEVAUX e LATRUBESSE, 2017). Dependendo da competência e da capacidade de transporte do fluxo, essas partículas podem ser transportadas para fora da bacia hidrográfica ou depositarem-se ao longo do canal, em suas margens ou planície (CHRISTOFOLETTI, 1981; SUGUIO e BIGARELLA, 1990).

De acordo com Cunha (2013), a dinâmica de um rio é resultado das condições existentes na bacia, sejam elas naturais ou antrópicas. Com base nisso, compreende-se que o tempo do transporte dos sedimentos pela rede de drenagem, dependerá das condições do sistema na bacia hidrográfica, que variam conforme o regime hidrológico, padrão dos canais e da cobertura do solo.

Todos os acontecimentos que ocorrem na bacia de drenagem repercutem, direta ou indiretamente, nos rios. As condições climáticas, a cobertura vegetal e a litologia são fatores que controlam a morfogênese das vertentes, e por sua vez a carga detrítica a ser fornecida aos rios (CHRISTOFOLETTI, 1980 p.52).

A combinação das forças que atuam no espaço, com maior ou menor intensidade, vão definir os processos atuantes no relevo. A dinâmica desses processos é atrelada a frequência, intensidade e magnitude, mas fortemente determinada pela resistência dos materiais (STEVAUX e LATRUBESSE, 2017). Desta dinâmica de processos erosivos e deposicionais, resultam as feições fluviais, que são, por sua vez, continuamente sujeitas a ajustes em seu modelado. Consequentemente, a análise da composição dos fatores de controle e da forma é determinante para compreensão do desenvolvimento dos processos (MARQUES, 1998).

A rugosidade de um canal define a tensão de cisalhamento, que atua diretamente na dinâmica de transporte e/ou sedimentação. A resistência ao fluxo pode ser atribuída a diversos elementos, como o tipo de sedimentos, geometria do canal, vegetação ripária e detritos lenhosos como galhos e troncos de árvores (BINDA e FERNANDEZ, 2011).

Hervouet et al. (2011) utilizaram imagens aéreas de alta resolução para realizar análise multitemporal do desenvolvimento da vegetação primária em canais fluviais localizados nos Alpes Suíços. Nesta análise, constatou-se que estabelecimento progressivo de vegetação leva a uma tendência geral de estreitamento do corredor do rio. Neste sentido, sabendo que de acordo com Stevaux e Latrubesse (2017) o desenvolvimento de vegetação em barras fluviais tende gerar maior atrito, reduz a velocidade da água, assim aumentando a sedimentação sobre determinado ponto (STEVAX e LATRUBESSE, 2017).

A energia do fluxo hídrico do canal condiciona a quantidade e o tamanho das partículas transportadas pela carga de fundo, assim, verifica-se que a competência de um canal é definida pelo tamanho da partícula transportada (STEVAX e LATRUBESSE, 2017). Durante eventos pluviométricos, há o aumento da velocidade e energia do fluxo. Por este motivo, intensificam-se os processos erosivos e a disponibilização de sedimentos. Assim, associa-se às vazões de margens plenas o maior potencial modelador das feições fluviais (WOLMAN e MILLER, 1960; FERNANDEZ et al., 2001). Contudo, destaca Stevaux e Latrubesse (2017), que eventos extremos e de grande magnitude podem modificar abruptamente os sistemas fluviais, provocando o soterramento do leito e da planície, tal como o ocorrido na bacia hidrográfica do rio Jacaré em março de 2011 (SILVEIRA et al., 2012).

Durante períodos de estiagem ou com chuvas menos intensas, predominam os processos deposicionais, onde há o acúmulo e formação de feições sedimentares (RICCOMINI et al., 2009). Neste sentido, a presença de escombros e detritos lenhosos, como galhos, raízes e troncos, pode exercer uma expressiva contribuição para diferenciação de tensões de cisalhamento que ensejam processos erosivos ou de sedimentação e possuem papel importante no desenvolvimento de canais (RUSNÁK et al., 2017). Entretanto, vale esclarecer que a influência dos detritos no canal tende a diminuir em função do aumento da descarga e da profundidade em relação a superfície d'água (BINDA e FERNANDES, 2011).

Segundo Suguio (2003), canais fluviais são compostos por vários subambientes, tais como planície de inundação, diques, canais ativos e abandonados. Nos canais ativos ocorre, em geral, a formação de corpos arenosos com formas alongadas, que são denominadas como *barras de canal*. Brice (1964) define as barras como depósitos não vegetados que se mantêm submersos quando o rio atinge o nível de margens plenas. Santos et al. (1992) definem as barras como depósitos fluviais instáveis, emergentes no nível médio do rio, cuja vegetação constitui-se principalmente por gramíneas. Aponta ainda que o termo 'barra' se aplica desde a simples feição deposicional até formas complexas derivadas de múltiplos eventos erosivos deposicionais.

Importa esclarecer que as ilhas também são frequentemente formadas por depósitos sedimentares, apresentando, no entanto, maior estabilidade, desenvolvimento de vegetação arbustiva e/ou arbórea. As ilhas mantêm o fluxo do rio dividido até o nível de margens plenas,

ficando ela submersa, portanto, somente em eventos de extravasamento do leito menor (SANTOS et al., 1992; STEVAUX e LATRUBESSE, 2017).

A constituição da rugosidade e variações morfométricas das feições fluviais são dependentes da disponibilidade de sedimentos (ALLENM, 1982; BEST, 1993), associados aos processos sedimentares, erosivos e deposicionais. São condicionados pelo regime de escoamento, que variam principalmente com os índices pluviométricos e a topografia (SMITH, 1974; CHISTOFOLETTI, 1981). Neste sentido, Riccomini e Coimbra (1993) comentam que o aumento da carga de fundo em um rio pode transformar o padrão do canal, onde um sistema meandrante pode mudar para anastomosado e um sistema retilíneo para entrelaçado.

Segundo Stevaux e Latrubesse (2017), a velocidade de propagação de uma forma de leito pode fornecer uma ideia bastante aproximada da descarga de material de fundo. Isto porque um ritmo acentuado de migração de depósitos ou de formação de novas feições sedimentares ou erosivas manifesta a contingência de maior carreamento de sedimentos. O monitoramento da velocidade de propagação de uma forma de leito é uma variável utilizada para estimar o volume da carga de fundo transportada. Tal relação foi estudada por Martins e Stevaux (2005) em rios de grande porte, onde verificaram, em feições fluviais no rio Paraná e Araguaia, deslocamentos de 2 a 10 metros por dia.

O tempo de permanência das formas dependerá de fatores relacionados ao regime hídrico, clima, tectonismo e interferência antrópica. Especialmente em ambiente aquático, as pequenas formas que constituem a rugosidade do leito são formadas por areia não consolidada. Tais formas podem apresentar duração bastante efêmera, sendo, portanto, consideradas formas de transporte. As formas de leito, por sua vez, como barras, ilhas, planície de inundação e terraços são feições morfológicas de depósitos sedimentares fluviais, possuem diferentes tempos de permanência no sistema que variam de vários dias a milhares de anos (STEVAUX e LATRUBESSE, 2017).

Na natureza, eventos de grande magnitude tem elevado poder transformador do sistema geomorfológico. Tais eventos são, no entanto, menos usuais. Eventos de menor intensidade, por sua vez, possuem menor potencial transformador. No entanto, a alta frequência dos eventos menores é responsável pela dinâmica e manutenção dos sistemas geomorfológicos (STEVAUX e LATRUBESSE, 2017). Segundo Knigton (1998), existe uma tendência nos estudos fluviais de atribuir aos eventos de cheias extremas o poder modelador da morfologia dos canais e da planície de inundação, que antes era atribuído apenas as cheias moderadas ou as descargas dominantes.

A forma do leito de um rio em uma seção transversal pode ser definida em um período relativo a alguns dias, a forma do perfil longitudinal, entretanto, leva milhares de anos para se formar, salvo em casos de ocorrência de eventos extremos ou intervenção antrópica. No decorrer do desenvolvimento do perfil longitudinal, muitas formas e processos de menor hierarquia se desenvolvem e desaparecem no sistema (STEVAUX e LATRUBESSE, 2017).

O tempo de monitoramento das feições e mudanças das formas de canal varia conforme os objetivos das pesquisas. Análises sobre mudanças no estilo e padrão de canais, podem

necessitar de vários anos de monitoramento, como os trabalhos apresentados por Vieira e Cunha (2001) Cunha (2012), Marçal (2013). Alguns necessitam apenas de alguns meses como Fernandez (2001) e Binda e Fernandez (2011).

Em face dos aspectos antropogênicos na constituição dos processos modeladores do relevo, defendidos por Peloggia (1998), Steffen et al. (2007) e outros, muitos estudos atuais têm se voltado a análises mais específicas da relação do homem com o relevo, sendo esta, uma tendência já apontada por Marques (1998) e Silva (2010). Sobre este aspecto, a presente pesquisa inclui em sua análise, uma abordagem sobre os efeitos das alterações na dinâmica dos sistemas hídricos decorrentes de intervenções antrópicas, apresentada na seção seguinte.

2.1.2 Alterações na dinâmica dos sistemas hídricos decorrentes de intervenções antrópicas

Forças endógenas, provenientes do interior do planeta, e exógenas, representadas pela ação climática, atuam de maneira mais ampla modelagem da superfície terrestre. Esta última é também desempenhada por atividades biológicas e pela ação antrópica (MARQUES, 1998). Luz e Marçal (2016) discutem que a ação antrópica nos rios e no relevo assume um papel importante na natureza e posiciona o homem também como um agente geológico. A análise dos aspectos da geomorfologia fluvial contemporânea pode ser, portanto, compreendida a partir de sua relação com o período do Antropoceno (PELOGGIA, 1998; LUZ e MARÇAL, 2016), que remete aos efeitos combinados, diretos e indiretos, das atividades de seres humanos, como:

As alterações no fluxo dos rios, as mudanças na estratigrafia e estrutura dos solos, as modificações na topografia, o recuo das linhas costeiras, as transformações irreversíveis na vegetação, as alterações dos sistemas ecológicos e hidrológicos, a introdução de novos materiais, as mudanças no clima e nas respostas dos processos que indicam que o domínio de natureza sobre a terra está sendo desafiado pela emergência do que pode ser chamado de Força Antrópica (LUZ e MARÇAL, 2016, p. 144).

O desenvolvimento das primeiras comunidades humanas ocorreu próxima aos rios, em áreas geralmente planas, onde era possível obter água e alimento com facilidade e o deslocamento era facilitado pelas vias fluviais. Estas comunidades, sujeitas às condições naturalmente impostas pelos elementos da paisagem, tais como a configuração do relevo, a presença de cursos d'água e sua dinâmica de cheias, desenvolveram métodos e técnicas de modo a superar possíveis "adversidades" advindas de tais elementos, facilitando, inclusive, os deslocamentos populacionais e o estabelecimento de novas áreas de ocupação (TUCCI, 2005; CUNHA, 2012).

Na história contemporânea, o modelo de gestão de problemas relacionados aos cursos d'água baseia-se em soluções da engenharia convencional e, por vezes, higienista (TUCCI, 2005), as quais priorizam a resolução de problemas via canalização e retificação de rios e córregos. Tais intervenções, envolvem tipicamente a remoção de vegetação ripária e remoção de meandros, ocasionando a reformulação da morfometria do canal, transformando-os em perfis regulares (LOVI, 2012). Estas modificações têm o objetivo de diminuir o tempo de permanência

de água nas bacias hidrográficas com o encurtamento do curso do rio, ocasionando o aumento da velocidade de escoamento da água e rebaixamento do nível de base (TUCCI, 2005; BINDER, 2001).

Assumpção e Marçal (2012) verificam que muitos benefícios podem ser obtidos com a modificação artificial da morfologia dos canais fluviais, tais como o aumento da eficiência da drenagem, auxílio no controle de inundações e de proliferação de vetores, ampliação da área de terras secas para urbanização ou agricultura e a criação de canais de navegação. Verificam também que, frequentemente, são constatados impactos negativos, principalmente associados a aceleração dos processos erosivos e deposicionais. Explicam que tais impactos são ainda agravados quando há ausência ou negligenciamento do planejamento territorial e ambiental.

No Brasil, centenas de rios foram e continuam passando por intervenções que visam a adequação dos cursos d'água à expansão ocupacional e ao desenvolvimento econômico. Um exemplo refere-se ao extinto Departamento Nacional de Obras de Saneamento (DNOS), que tinha por atribuição a execução de obras de drenagem, irrigação e prevenção contra inundações, em cooperação com governos estaduais e municipais (BRASIL, 1946) realizou no país diversas obras de canalização e retificação de rios. Muitas destas obras resultaram em profundas modificações dos sistemas fluviais e na intensificação de problemas com inundações e assoreamento. Fazendo com que as enchentes e a manutenção do canal se tornem mais frequentes.

Assumpção e Marçal (2012) e Brierley et al. (2019) discutem a interferências das obras de retificação no rio Macaé, localizado na Baixada da Fluminense, RJ (Figura 2). Assumpção e Marçal (2012) observam que os ajustes implementados no canal fluvial provocam um rearranjo da dinâmica hídrica, redirecionando ou potencializando processos de erosão ou sedimentação em escalas não compatíveis com a dinâmica atual do rio.

Os autores supracitados verificam que, após realização das obras, as inundações se tornaram mais frequentes e trabalhos de manutenção dos canais são constantemente necessários. Segundo Cunha (2012), verifica-se que em tempos relativamente curtos (menos de uma década), a dinâmica de alguns rios, sobretudo em planícies litorâneas, tende apresentar novas mudanças na morfologia e dos canais. Com isso, o tempo de efetividade da função de tais obras tende ser reduzido e perder eficácia em poucos anos.



Figura 2 Trecho retificado do rio Macaé (1970). Acervo do Extinto DNOS
Fonte: Brierley et al. (2019).

Como resultado de obras desta natureza, mudanças hidrológicas e morfométricas, novas condições de escoamento, erosão e transporte de sedimentos são verificadas (BINDER, 2001; SUGUIO, 2003; CUNHA, 2013). Intervenções em canais fluviais, sobretudo obras de macrodrenagem, demandam, portanto, planejamento e análise sistêmica da bacia hidrográfica e dos processos geomorfológicos. O negligenciamento das particularidades de cada ambiente fluvial pode resultar na evolução e descontrole dos processos, culminando, em novas mudanças na geometria e na degradação dos rios, com riscos geomorfológicos e impactos ambientais, sociais e econômicos (CUNHA, 1994; SUGUIO, 2003; GRISON e KOBAYAMA, 2011 e OLIVEIRA, 2012; BELLETTI et al., 2017).

A retificação de rios aumenta a velocidade do escoamento da água, diminuindo o tempo de permanência da água na bacia e transferindo inundações para jusante. Não obstante, aumenta também o potencial erosivo do sistema, fator ainda mais representativo em regiões de relevo acidentado, como é o caso da Serra do Mar. A jusante, nos locais de menor potencial hidráulico do rio, ocorre a sedimentação e o assoreamento, dificultando a navegação e ampliando áreas de inundação (CUNHA, 2012).

O desassoreamento, além de possuir alto custo, rebaixa o nível de base do rio, aumentando ainda mais potencial erosivo do sistema remontante, tendo em vista que o rio busca reestabelecer seu equilíbrio dinâmico (SUGUIO, 2003). Um possível resultado é a necessidade frequentes obras de desassoreamento.

Dentre os problemas geralmente identificados nessas obras, destaca-se o aumento da energia potencial do canal, que desencadeia e acelera processos erosivos a montante, resultando na intensificação da produção de sedimentos que serão depositados nas áreas de menor energia a jusante (SUGUIO, 2003). Isto retroalimenta as inundações, além de demandar frequente manutenção do canal com novas obras de desassoreamento e, para rios de maior porte obras de dragagens podem ser necessárias. Também são verificados impactos na vegetação ripária e na mata ciliar (LOVI, 2012; ASSUMPÇÃO e MARÇAL, 2012).

A interferência antrópica nos sistemas fluviais brasileiros afeta as condições naturais dos rios de diversas maneiras, tais como alterações no regime hidrológico, nas taxas de degradação e agração e no balanço sedimentar. Como resultado, profundas alterações são verificadas nos pulsos de cheia e vazante. Com mudanças no suprimento de nutrientes, há também interferência direta nos ecossistemas aquáticos e manguezais (STEVAUX e LATRUBESSE, 2017; CUNHA, 2012).

Cunha (2012) explica que o aprofundamento do nível de base dos rios provoca o rebaixamento do nível piezométrico, drenando a planície de inundação. A mudança no volume de água no solo, por sua vez, afeta o desenvolvimento de florestas de várzea, terras baixas e manguezais, prejudicando a fauna e a flora de tais ecossistemas. Em planícies litorâneas este processo torna-se particularmente sensível, podendo resultar no fenômeno da penetração da cunha salina durante a marés enchente.

As intervenções nos canais fluviais se tornaram alvo de críticas somente após meados do século XX (BROOKES, 1994; BINDER, 1998; RUTHERFURD, 2000; WIZGA, 2001; COLLINS e KNOX, 2003; LOVI, 2012). Estes trabalhos evidenciam a urgência de um novo paradigma baseado em estudos ambientais interdisciplinares que consideram os princípios da geomorfologia fluvial, voltando-se ao fortalecimento dos ecossistemas aquáticos com os conceitos de recuperação, reabilitação, revitalização e renaturalização dos rios (LOVI, 2012).

Brierley et al. (2002) destaca que ao longo da última década os princípios da geomorfologia fluvial foram adotados como um componente central das práticas de manejo fluvial em países desenvolvidos. Assumpção e Marçal (2012) apontam que no Brasil, no entanto, ainda predomina o emprego das técnicas que se tornaram alvo de crítica em naqueles países.

De acordo com Stevaux e Latrubesse (2017), vale considerar os avanços no desenvolvimento de técnicas em grandes obras fluviais em relação ao conhecimento sobre a hidráulica e dinâmica hídrica fluvial. Todavia, apesar dos avanços técnicos e científicos no contexto internacional, ainda são poucos os trabalhos que discutem os efeitos de intervenções em rios tropicais no Brasil (CUNHA, 1995 e 2012; FRIEDENREICH e PINHEIRO, 2002; ASSUMPÇÃO e MARÇAL, 2012). A incipiente discussão sobre o tema se reflete no conhecimento técnico empregado por tomadores de decisão no âmbito da gestão hídrica, que baseado, predominantemente, em abordagens tradicionais que empregam as mesmas técnicas que foram alvo de críticas durante a segunda metade do século XX nos países desenvolvidos (ASSUMPÇÃO e MARÇAL, 2012).

Neste sentido, destaca-se que a área de estudo da presente pesquisa passou e usualmente passa por várias intervenções desta natureza. Obras de retificação e desassoreamento foram realizadas em diferentes períodos e trechos da bacia. Destacam-se as obras realizadas após evento extremo de março de 2011, já anteriormente citados e os presentes projetos (ANEXO I) de dragagem e retificação de trechos da planície do rio Jacareí e de seu afluente rio Piraquara (PARANÁ, 2017).

2.1.3 Planejamento Ambiental

O planejamento ambiental advém de uma íntima relação com o ambiente e torna-se mais eficiente e efetivo à medida da predição das áreas de risco ou de fragilidade ambiental, bem como da vocação das áreas para uso e ocupação humana (CHRISTOFOLETTI, 1999). Trata-se de uma etapa primordial de estudos que antecede uma ação, compreende análise e definição de objetivos e estratégias para o ordenamento do espaço (SANTOS, 2009).

Desde as primeiras civilizações, critérios baseados na topografia e clima eram considerados para o estabelecimento e fixação das primeiras comunidades. Na Grécia Antiga, desenvolveram-se estudos ambientais para basear o planejamento ambiental a distribuição da população (SANTOS, 2009). Assim, a investigação dos processos geomorfológicos atuais torna-se imprescindível para a compreensão da dinâmica do ambiente e formas de ocupação do território (GREGORY, 1985).

Ross (1992) aponta que os diferentes tamanhos e formas do relevo estão diretamente ligados a uma cronologia de processos e possuem uma gênese. Klimazewski (1963), no entanto, salienta que a análise geomorfológica das formas e processos que ocorrem no relevo deve ser pautada não apenas sob o aspecto qualitativo (origem, idade), mas também quantitativo (distribuição, frequência, dimensão e relação mútua entre as formas).

As formas e processos geomorfológicos de ambientes fluviais são destacados como componentes essenciais na análise, planejamento e gestão do território. Destaca-se, nesse contexto, o planejamento de novas áreas urbanas sustentáveis em países desenvolvidos e na China (BELLETTI et al., 2017).

A Geomorfologia se apresenta como um componente efetivo para a análise e gerenciamento de recursos hídricos. De acordo com Brierley et al. (2002), a aplicação de investimentos para o planejamento ambiental que envolvam a drenagem deve estabelecer prioridades baseadas na dinâmica e processos hidrogeomorfológicos e na capacidade de ajuste fluvial dos rios. Todavia, Gregory (1985) ressalta que o objetivo da geomorfologia aplicada não é prevenir ou reduzir o desenvolvimento ou uso dos recursos, mas, em vez disso, otimizar o uso, reduzindo tanto os custos quanto os impactos.

Cassetti (1991) considera que a Geomorfologia se reveste de importantes questões sociais, mas sobretudo de questões ambientais. Reforçando este argumento, Ross (1992) argumenta que o planejamento fundamenta o gerenciamento e a gestão ambiental, onde devem se desenvolver estudos ambientais que contemplem as necessidades humanas e respeitem os limites naturais do ambiente. Segundo o autor, tais estudos devem considerar as potencialidades

dos recursos e as fragilidades dos ambientes naturais. Deste modo, os estudos geomorfológicos funcionam como instrumento de apoio técnico aos mais diversos interesses políticos e sociais. Neste contexto, importa destacar que o estudo ambiental perpassa a etapa de planejamento e tem continuidade na gestão, necessitando de constante gerenciamento, monitoramento e novas fases de planejamento (SANTOS, 2009).

Um dos principais instrumentos para o planejamento e estudos ambientais é o mapeamento, pois torna a leitura espacial mais clara e compreensível para gestores do território, permite especializar as potencialidades, fragilidades e restrições de um território, bem como estabelecer zonas de uso e exclusão de atividades (TUCCI, 2005). Desta forma, o monitoramento e mapeamento realizados neste estudo, apresentam potenciais contribuições para as discussões que envolvam planejamento e estudos ambientais sobre rios litorâneos paranaenses.

2.2 Análise do relevo e mapeamento geomorfológico

O mapeamento geomorfológico é um instrumento bem estabelecido para examinar os processos da superfície da terra e a evolução da paisagem em uma variedade de contextos ambientais (CHANDLER et al., 2018). Para Casseti (2005) a cartografia geomorfológica se constitui em importante instrumento na espacialização dos fatos geomorfológicos, permite representar a gênese das formas do relevo e suas relações com a estrutura e processos. Segundo Argento (2013), possui um carácter multidisciplinar, pois serve de interface com múltiplas ciências e é um importante subsídio para o planejamento ambiental e territorial.

Devido às diversas configurações morfológicas e aos diferentes ritmos de mudanças proporcionadas pela combinação dos elementos geológicos, climáticos, pedológicos e biológicos, a representação das formas de relevo é uma atividade desafiadora no meio científico. Atividade essa facilitada pela contínua evolução de ferramentas e instrumentos tecnológicos, como imagens de sensoriamento remoto com resolução espacial e temporal cada vez maiores e por softwares de geoprocessamento (BOTELHO e PELECH 2019). Tais softwares potencializam o uso da informação através de procedimentos de análise espacial e permitem produzir novos dados a partir de operações matemáticas sobre mapas (CREPANI, 2001).

Por outro lado, a diversidade de métodos possibilitada pelas novas tecnologias, resulta em diferentes métodos de interpretação e representação do relevo. Frente a esta questão, frequentemente são citadas por pesquisadores geomorfólogos as incompatibilidades de escalas, legendas e lógicas de interpretação do relevo, dificultando a comparação e a utilização simultânea (BOTELHO e PELECH, 2019 e PELECH et al., 2019). Neste sentido, Stevaux e Latrubesse (2017) relatam dificuldades da representação cartográfica com múltiplas escalas com nomenclaturas amplas para classificação formas e processos do relevo. Isto pois há uma variação do objeto de estudo em função da escala, podendo incorrer em um conjunto de informações distintas sobre o relevo (SILVEIRA, 2020). Isto é, diferentes escalas permitirão o mapeamento de diferentes alvos. Neste sentido, Argento (2013) pondera que é importante para

o mapeamento geomorfológico o esforço para criar um ordenamento de legendas que atendam diferentes perspectivas de macro, meso e microescala.

2.2.1 Escala na análise geomorfológica

Um sistema fluvial é composto por diversas variáveis que interagem entre si e em escalas temporais e espaciais diferentes. Os processos fluviais podem ser localizados e efêmeros ou regionais e duradouros. Stevaux e Latrubesse (2017) sugerem que a escala espaço-temporal é conceito chave para o mapeamento geomorfológico em estudos fluviais.

Entre os fundamentos da Geomorfologia moderna, destaca-se a compreensão dos processos a partir das noções de escala espaço-temporal, frequência e magnitude. Segundo Stevaux e Latrubesse (2017), os processos geomorfológicos em um sistema fluvial podem ocorrer durante alguns segundos ou milhões de anos, e abrangem áreas que vão de centímetros a milhares de quilômetros.

Eventos extremos são de grande magnitude e possuem elevado potencial transformador do relevo. Eles ocorrem, no entanto, em curto intervalo de tempo e com baixa frequência. Os eventos de baixa ou moderada intensidade, por sua vez, possuem alta frequência (WOLMAN e MILLER, 1960). Stevaux e Latrubesse (2017) comentam que eventos extremos e de grande magnitude podem modificar abruptamente os sistemas fluviais, provocando o soterramento do leito e da planície correspondentes. Eles, no entanto, ocorrem episodicamente. Wolman e Miller (1960) destacam ainda que a forma de um canal fluvial é determinada por eventos de magnitude moderada que ocorrem com maior frequência. Nesse sistema, segundo Belletti et al. (2017), os processos e formas em escalas menores são dominados por escalas maiores. Não obstante, ressalta-se que as feições fluviais são muitas vezes efêmeras. Elas podem se formar, se deslocar e desaparecer em poucos dias ou minutos.

A escala de mapeamento corresponde a um recurso matemático fundamental da cartografia. A escala é uma fração que indica a relação de proporção entre as medidas do real e aquelas da sua representação gráfica (CASTRO, 2017). Segundo Kohler (2002), a definição da escala de estudo de um relevo determina as estratégias e técnicas de abordagem da análise geomorfológica. Assim, quanto maior a escala empregada na observação de um fenômeno geomorfológico, maior o nível de detalhamento. Em função disso, torna-se possível mapear pequenos relevos e processos atuais como evolução de feições fluviais, ravinas e voçorocas. No emprego de escalas pequenas, no entanto, o detalhamento espacial é menor e a dinâmica mais lenta. Deriva continental e morfoestruturas são exemplos de processos visualizados em escalas pequenas. Importa elucidar que a escala temporal, segundo Kohler (2002) *apud* Schum (1985), pode ser classificada em mega (milhares de anos), meso (centenas de anos) e micro (de um a dezenas de anos).

Destaca-se ainda que é usual em publicações científicas o uso dos termos grande escala, elevada ou alta resolução ou detalhamento, para se referir a mapeamentos baseados em imagens de satélites com resolução métricas e apresentando produtos com escalas de 1:10.000

ou até 1:25.0000. Neste trabalho são utilizadas imagens centimétricas, o que permitem a geração de produtos em escala 1:80

De acordo com Sampaio e Brandalize (2018), a acurácia posicional é um importante item a ser analisado em uma base cartográfica e corresponde a uma estimativa de erro de posicionamento. No Brasil, a mensuração da acurácia posicional é regulamentada a partir do PEC (Padrão de Exatidão Cartográfica), conforme Decreto 89817/84 e pela PEC-PCD (Padrão de Exatidão Cartográfica para Produtos da Cartografia Digital), segundo a DSG (Diretoria do Serviço Geográfico, 2016). Com base nisso, os produtos cartográficos, em diferentes escalas, podem ser enquadrados em quatro classes (A, B, C e D) para cada escala, a depender dos padrões de exatidão observados, sendo classe D a menor qualidade tolerável dentro de uma determinada escala.

2.2.2 Classificação do relevo

Esta seção do trabalho discute brevemente proposições para classificação geomorfológica do relevo, exemplificando as metodologias de abordagem para o território brasileiro e os métodos que contemplam aspectos específicos do relevo, como a classificação de bacias hidrográficas, padrão fluvial e estilos fluviais.

Diversos trabalhos se voltam à classificação geomorfológica do relevo e empregam métodos distintos. Segundo Lencioni (2012), nos anos 1940, Aroldo de Azevedo elaborou a primeira classificação das unidades de relevo do Brasil. Tal modelo de classificação era baseado no perfil topográfico do relevo e foi mais tarde substituída pela proposta de Aziz Ab'Sáber (1970b). Este, fundamentado em conceitos propriamente geomorfológicos, propôs a sólida classificação geomorfológica para o Brasil. Em 1970, o Governo Brasileiro promoveu um levantamento sistemático de todo o território e disponibilizou informações sobre geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra (IBGE, 2018a). Com base nesse levantamento, Ross (1992) propõe uma nova classificação taxonômica baseada na tipologia do relevo e firmada na gênese e inter-relação dos diferentes componentes da natureza.

As interações entre as formas e processos geomorfológicos constituem fenômenos que ocorrem em micro e macro escalas, temporal e espacial (CHRISTOFOLETTI, 1980 e 1981). Entretanto, há de se destacar que dentre as principais referências para classificação e mapeamento do relevo brasileiro (Jurandyr Ross; Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística; e Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais), há prevalência de proposições para mapeamentos geomorfológicos abrangentes ou regionais, baseados na utilização de escalas menores, como 1:250.000 (PELECH et al., 2009), em detrimento do nível de detalhes e pequenas feições. Segundo Ross (1992), tais escalas relacionam-se com as limitações existentes no que tange à resolução espacial das imagens aéreas e orbitais disponíveis. Ademais, a importância destes trabalhos é expressa por uma grande diversidade de pesquisas que as utilizam como referência metodológica e conceitual (BOTELHO e PELECH, 2019).

Atualmente, há no Brasil uma grande diversidade de metodologias e aplicações distintas de classificações geomorfológicas. Segundo Botelho e Pelech (2019), 86% das

publicações científicas na Revista Brasileira de Geomorfologia correspondem a métodos elaborados pelos próprios autores. Nesse contexto, ressaltam Botelho e Pelech (2019), que a classificação taxonômica proposta por Ross (1992), resultou em importantes avanços, notadamente no que se refere à padrões de legenda e à organização dos níveis hierárquicos de classificação.

A proposição em questão representa hoje no Brasil uma importante referência para novos delineamentos da classificação geral do relevo. Apresenta pressupostos metodológicos para a taxonomia das unidades, feições e formas a serem representadas pela cartografia geomorfológica. De acordo com Ross (1992), a classificação corresponde a seis níveis taxonômicos que compreendem um enquadramento das macroestruturas do relevo às microfeições ocasionadas por processos atuais, conforme Quadro 1:

Quadro 1 Resumo da classificação taxonômica

Nível	Nome	Correspondência
1º Táxon	Unidades Morfoestruturais ou Superfícies Geneticamente Homogêneas	Macroestruturas como os escudos, dobramentos e bacias sedimentares.
2º Táxon	Unidades Morfoesculturais ou Formas de Relevo	Compartimentos gerados pela ação climática ao longo do tempo, como os planaltos, planícies e depressões. Estas formas são inseridas em uma unidade morfoestruturais.
3º Táxon	Unidade Morfológica, ou Tipos de Relevo	Agrupamento de formas relativas aos modelados, distinguidos pelas diferenças de rugosidade topográfica ou de índice de dissecação do relevo, bem como pelo formato dos topos, vertentes e vales. Assim, várias unidades morfológicas irão compor uma unidade morfoestrutural.
4º Táxon	Unidades de Padrão de Formas Semelhantes	Formas de relevo formadas por agradação, como planícies fluviais, matilhas ou terraços e por degradação, como colinas morros e cristas.
5º Táxon	Tipos de Vertente	Formato do setor de uma vertente, que pode ser retilíneo, convexo, plano, aguçado, abrupto e côncavo. Os tipos de vertente, corresponde a dimensões menores no relevo, por isso, denota-se serem de gênese e idade mais recente.
6º Táxon	Formas e Processos Atuais	Menores formas de relevo, resultantes da ação dos processos erosivos e deposicionais atuais que ocorrem ao longo das vertentes e geralmente indução antrópica como as boçorocas, ravinas, corte de talude, escavações, depósitos tecnogênicos, como assoreamentos e aterros, ou as consideradas naturais, como: cicatrizes de escorregamento, bancos de deposição fluvial, dentre outros

Fonte: Ross (1992). Organização: o autor

O sexto táxon corresponde ao nível mais detalhado da proposição de Ross (1992) (Figura 3). De acordo com o próprio autor, esta proposta de classificação é de significativo valor para a cartografia geomorfológica de detalhe, mas deficitária quando se deseja representar áreas maiores e mais complexas, pois neste caso, tenderia a apresentar maior diversidade de categorias de formas. Em virtude das limitações relacionadas ao uso imagens orbitais e aéreas,

a proposta, desenvolvida em 1992, apresenta insuficiências no quinto e sexto nível taxonômico no que tange ao mapeamento das feições menores do relevo, como as feições cuja morfogênese seja fluvial (ROSS, 1992). Tais insuficiências para classificação e designação das formas e feições fluviais, são classificadas e debatidas com base em proposições específicas, como em Riccomini e Coimbra (2009), Christofolletti (1981), Schumm (1981), Leopold e Wolman (1957) e Schumm (1981).

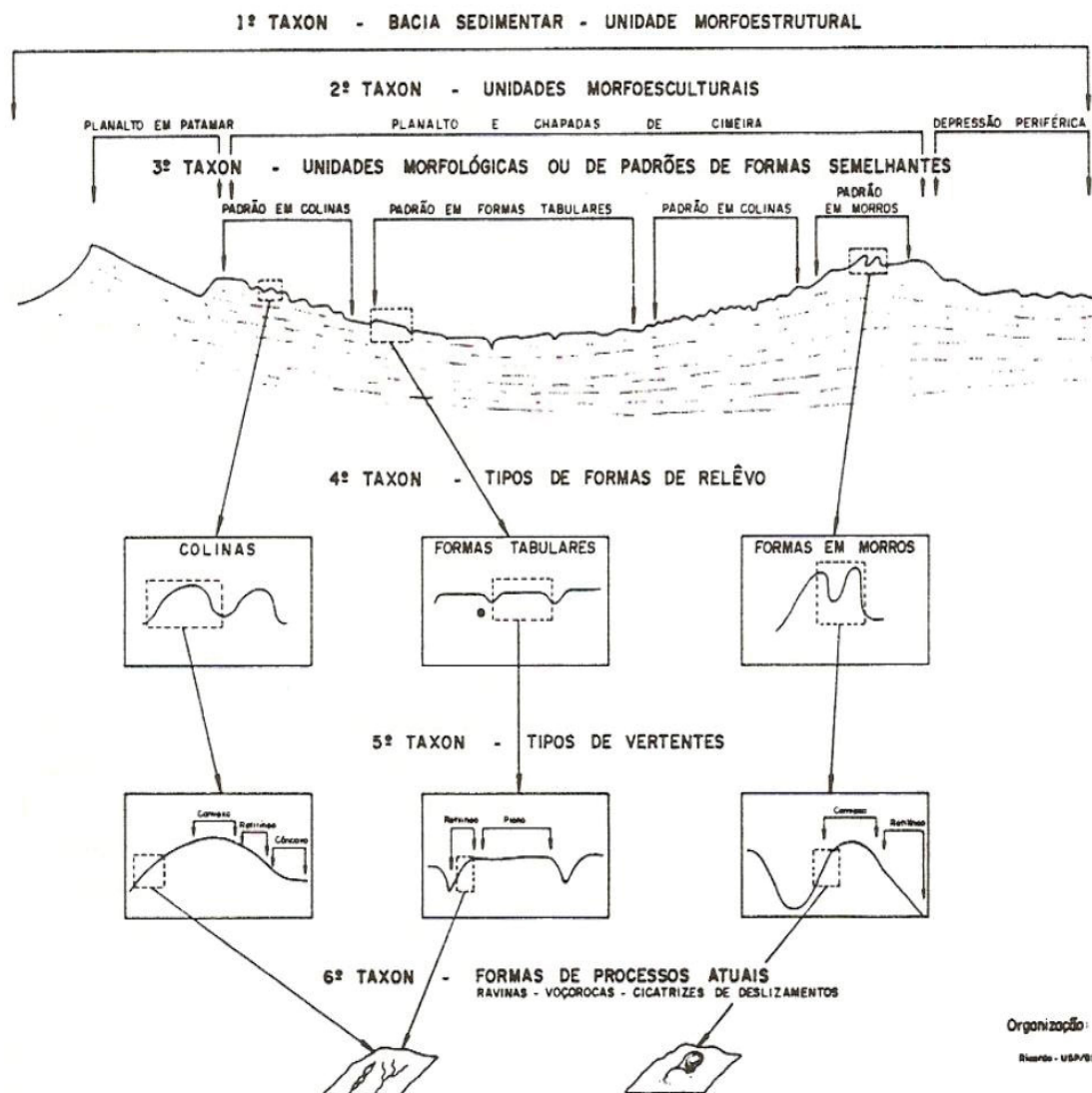


Figura 3 Classificação Taxonômica de Ross (1992)

Partindo, portanto, para métodos que contemplam aspectos específicos do relevo, como os canais fluviais e tipos de drenagem, Schumm (1985) destaca que a classificação de determinado padrão expressa sua dinâmica e características comportamentais. Com base nessa concepção, Christofolletti (1980) discute, a partir de Leopold e Maddock (1953), o arranjo espacial dos cursos fluviais que definem padrões de drenagem das bacias hidrográficas: dendrítica, treliça, retangular, radial, anular ou paralela (Figura 4) (CHRISTOFOLETTI, 1980).

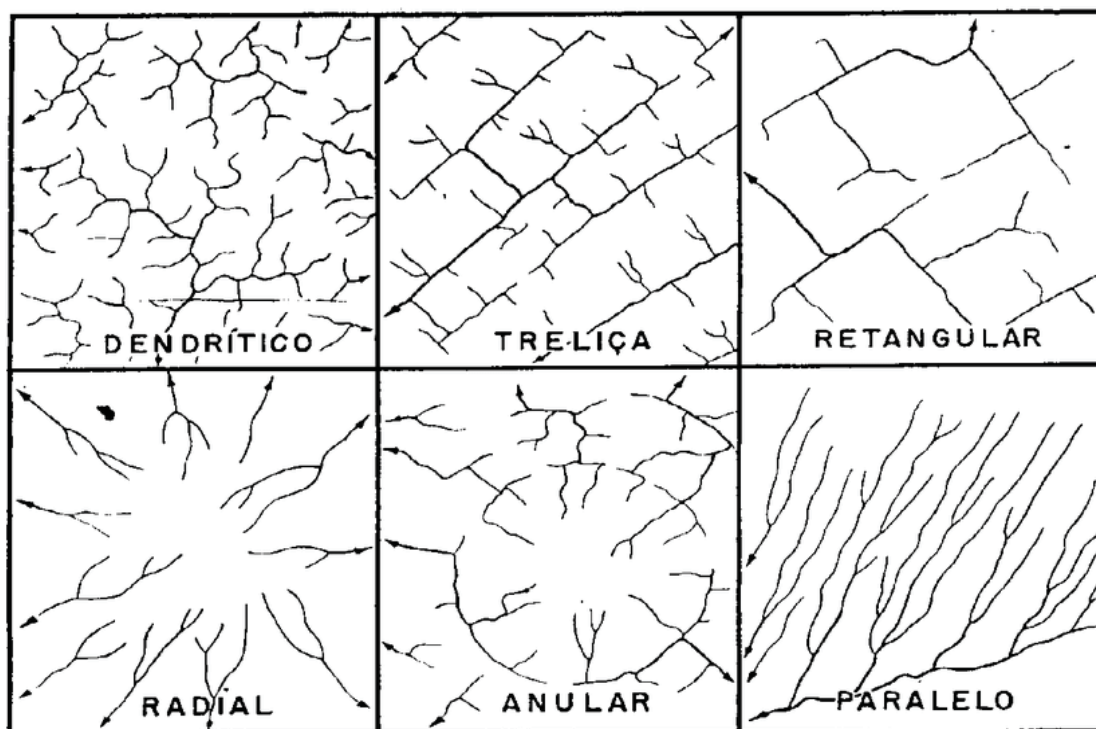


Figura 4 Padrões de Drenagem.
Fonte Christofolletti, (1981)

Ampliando a escala de análise das formas de relevo associadas a morfogênese fluvial, volta-se, portanto, à classificação dos canais. Shen et al. (1981) argumentam que a classificação de padrões fornece contribuições ao planejamento e gestão de rios, bem como às preocupações práticas da engenharia civil, pois revela o potencial de mudanças nos padrões que podem ocorrer em pontes e outros locais de construção.

Existe uma complexa combinação de fatores que controlam a morfologia de um canal, tal como a vazão, carga de sedimentos, cobertura vegetal das margens, variáveis climáticas e geológicas (CHRISTOFOLETTI, 1981; HERVOUET et al., 2011; STEVAUX e LATRUBESSE, 2017; BRIERLEY et al., 2019). Com base nestes fatores é possível definir, com algumas generalizações, os padrões de canais (RICCOMINI e COIMBRA, 2009).

Leopold e Wolman (1957) reconhecem três tipos básicos, caracterizados pelo grau de sinuosidade: meandrante; retilíneo e entrelaçado. Posteriormente, Schumm (1985) destaca a importância de um quarto padrão de morfologia: anastomosado. Sendo estes amplamente utilizados para a caracterização de canais fluviais (Figura 5).

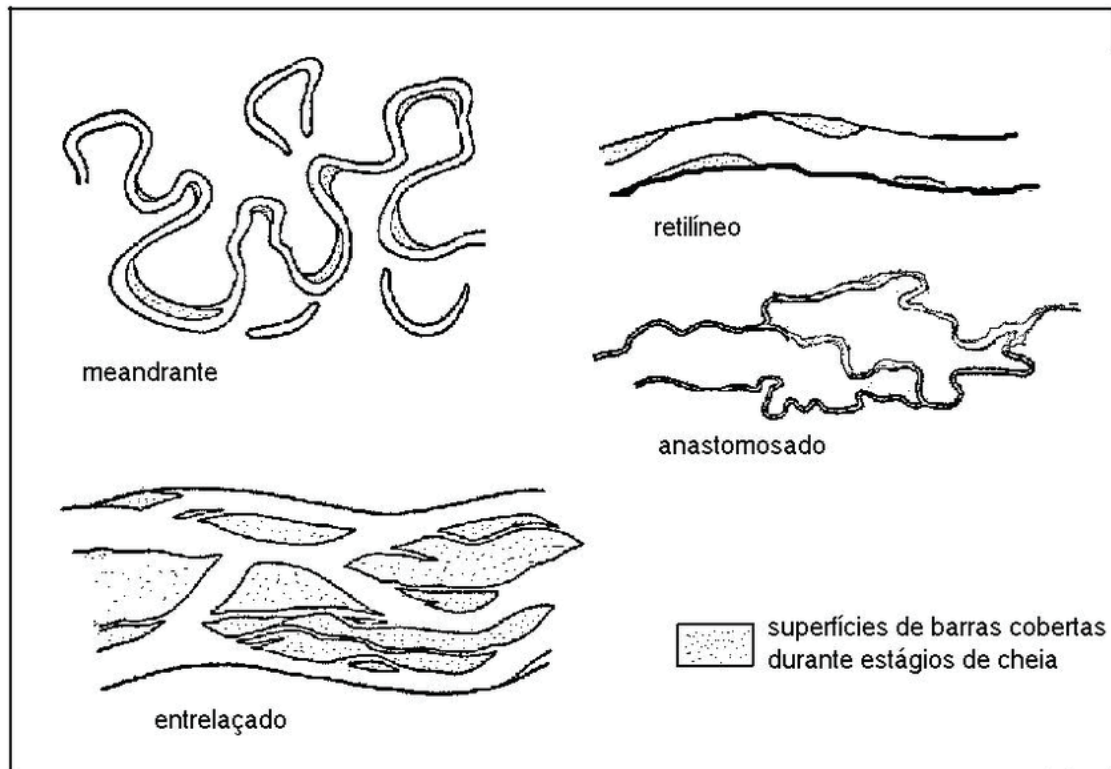


Figura 5 Classificação do padrão de canal fluvial.
Fonte: Riccomini e Coimbra (1993)

Em paralelo à classificação dos canais fluviais discutida por Leopold e Wolman (1957) e Riccomini e Coimbra (1993) e definidos com base no grau de sinuosidade do canal, Schumm (1981 e 1985) apresentam 14 variações em 3 padrões de canais baseados tipo de carga sedimentar predominante no canal: A) carga de fundo; B) carga mista; C) carga em suspensão (Figura 6).

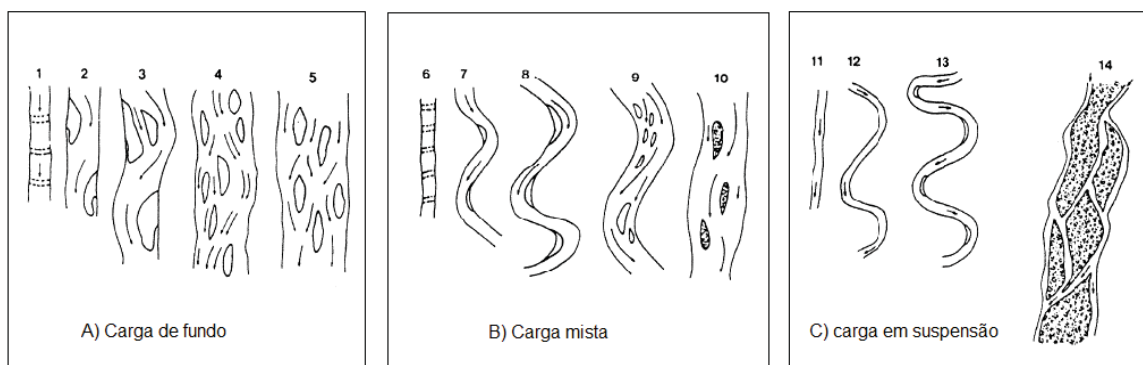


Figura 6 Variações no padrão de canais fluviais de acordo com o tipo de carga sedimentar predominante.

Fonte: Schumm (1981)

As classificações dos padrões de drenagem e dos canais fluviais aqui apresentadas, possuem um caráter de importância prática para a caracterização dos sistemas fluviais (SHEN et al., 1981). Contudo, carecem de legendas classificatórias que permitam discriminar em maiores níveis de detalhamento feições fluviais decorrentes de eventos pluviométricos, pois os padrões de drenagem tratam da configuração do sistema fluvial de uma bacia hidrográfica em sua

totalidade, e os padrões de canais tratam da classificação de seguimentos dos rios. Neste sentido, são insuficientes para análises pontuais, como as barras e margens côncavas nos canais fluviais.

Segundo Stevaux e Latrubesse (2017) existem poucas propostas de classificação de feições fluviais para rios brasileiros. Buscando discutir a alocação das feições fluviais decorrentes da deposição de sedimentos em canais Riccomini et al. (2009) propõe as denominações descritas no Quadro 2.

Quadro 2 Classificação das feições fluviais proposta por Riccomini et al. (2009)

Tipo de feição	Característica
Depósitos de canais	abrangem os sedimentos mais grossos (predominantemente areia média a grossa) alocados nas partes mais profundas do leito num sistema fluvial meandrante
Depósitos de barras de pontal	que comporta os sedimentos erodidos nas margens côncavas e depositados nas margens convexas dos meandros seguintes, sempre dependentes da sinuosidade do canal e características da carga transportada;
Depósitos de atalho	subdivididos em <i>atalho em corredeira</i> , quando o canal ocupa antigo local de sedimentação e o fluxo fluvial diminui paulatinamente; e em <i>atalho em colo</i> , formado quando ocorre abertura de um novo canal entre dois meandros
Depósitos de meandros abandonados	caracterizados pelo predomínio de depósitos pelíticos e formados quando ocorre mudança abrupta no curso do rio e diminuição repentina do afluxo de sedimentos de carga de fundo
Depósitos de diques marginais	feições elevadas na planície formadas em períodos de inundação, onde a água extravasa e deposita areias médias a finas próximo às margens do canal, formando corpos alongados nas suas bordas
Depósitos de rompimento de diques marginais	formados durante enchentes de grande porte, onde o rompimento dos diques antecede a formação de canais efêmeros e pouco definidos sobre a planície de inundação. São compostos de areias e argilas misturados com os depósitos do dique marginal e da planície de inundação e recobertas por camadas de argila da planície de inundação sucessora
Depósitos de planície de inundação	constituídas como planos aluviais alongados e recobertos nas enchentes, predominando processos de suspensão que geram coberturas de silte e argila laminadas. Estes depósitos formam nas partes mais baixas da planície as bacias de inundação, frequentemente cobertas por água. São intensamente vegetadas e podem apresentar horizontes de solo, marcas de raízes, gretas de contração e depósitos de turfa e carvão

Fonte: Riccomini et al. (2009)

Neste ponto, é preciso retomar que, segundo Botelho e Pelech (2019), a proposição de Ross (1992) apresenta caráter multiescalar, hierárquico e multicategórico. Trata-se de um sistema aberto, capaz de representar a grande diversidade geomorfológica em diferentes subáreas da geomorfologia (Fluvial, Continental, Costeira, Cárstica etc.). A classificação taxonômica permite, portanto, englobar em sua estrutura hierárquica, os padrões aqui discutidos, organizando-os em diferentes escalas e níveis taxonômicos, como: padrões de drenagem no terceiro nível taxonômico; padrão de canais fluviais no quinto táxon e as feições fluviais no sexto nível.

Tendo em vista a prerrogativa de utilizar uma classificação distinta, associada à estrutura taxonômica proposta por Ross (1992), Silva e Santos (2015) propuseram uma metodologia para identificação e classificação das formas deposicionais decorrentes de processos fluviais atuais.

Propuseram o enquadramento das feições fluviais no sexto nível taxonômico utilizando na legenda as denominações de Riccomini et al. (2009).

Vale mencionar também que outros conceitos e abordagens são utilizados para a classificação e avaliação de sistemas fluviais, como o conceito de Estilos Fluviais, discutido em Lima e Marçal (2013), Kleina et al. (2014) e Brierley et al. (2019). Este conceito é fundamentado em Brierley e Fryirs (2000), que propõem uma classificação ecossistêmica, a partir de uma abordagem ampla das dinâmicas e tendências ao longo dos rios e seus distintos trechos, permitindo uma análise das condições de cada estilo, potencial de recuperação e a própria reabilitação do canal. Os exemplos de aplicações deste método de classificação e avaliação de canais fluviais ocorreram em rios como Macaé, RJ (BRIERLEY et al., 2019) e rio Sagrado, PR (KLEINA et al., 2014).

Salienta-se que os trabalhos de cartografia geomorfológica geralmente utilizam como base imagens de satélites, sendo grande parte delas de baixa resolução espacial, o que representa dificuldades e limitações para o mapeamento de feições menores do relevo, como o quinto e sexto nível taxonômico e as feições fluviais (ROSS, 1992).

Segundo Schumm (1985) não apenas a classificação do padrão e descrição das características de um rio são de interesse, mas também a dinâmica de determinado padrão e seu potencial de mudança ao longo do tempo, sendo estes elementos motivo de preocupação prática para o desenvolvimento de projetos e gestão hídrica.

São significativos os avanços metodológicos no campo da geomorfologia. Marques (1998) discute que existe uma multiplicidade de novos recursos, mas salienta a necessidade do avanço de teorias. No que tange a esfera do mapeamento geomorfológico, por exemplo, verifica-se que ainda não existem critérios que promovam uma classificação dos fatos geomorfológicos e que estabeleçam de modo satisfatório categorias hierarquizadas em diferentes escalas espaciais e temporais. O referido argumento é reforçado por Ross (1985), que afirma não haver uma “sistemática única de trabalho”. Em face disso, assim como apresentado por Silva e Santos (2015), este trabalho procura apresentar contribuições para a representação de feições geomorfológicas que se enquadram em níveis taxonômicos detalhados. Ainda, procura fornecer subsídios para a discussão entorno da construção das primeiras aproximações do Sistema Brasileiro de Classificação do Relevo (SiBCR) (BOTELHO e PELECH, 2019).

2.2.3 Fotogrametria com VANT para mapeamento geomorfológico

A utilização de VANT combinada com a fotogrametria baseada em *Structure-from-Motion* (SfM) surgiu na última década como uma eficiente ferramenta para pesquisa geomorfológica, principalmente de detalhe, em diversos campos, tais como geomorfologia glacial, costeira, eólica, vulcânica e fluvial (CHANDLER et al., 2018; GAO et al., 2017; PEDREIRA et al., 2020; CARRIVICK E SMITH, 2018; VILES, 2016; HASS et al., 2020). Esse recurso preenche lacunas entre os tradicionais levantamentos e dados de sensoriamento remoto aéreo ou via satélite, principalmente no que se refere a frequência da obtenção de dados e resolução espacial das informações (SLEDZ et al., 2021; GAO et al., 2017; CARRIVICK e SMITH, 2018).

Na ciência geomorfológica, para a representação cartográfica das feições de relevo, recorre-se ao emprego de dados tridimensionais da superfície terrestre, como curvas de nível ou Modelos Digitais de Superfície (MDS) (GAO et al., 2017; KOHLER, 2002). Os avanços da informática viabilizaram o desenvolvimento da topografia e cartografia computadorizada, através de interfaces com fotogrametria, sensoriamento remoto em bases orbitais, aéreas e terrestres e a utilização de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) (ARGENTO, 2013). O aumento expressivo na quantidade de dados e sua resolução espacial e temporal, aumenta a possibilidade de mapear feições e processos geomorfológicos de forma detalhada e frequente (BOTELHO et al., 2019).

A utilização de imagens de satélite, como GeoEye, QuickBird e Pleiades, com resolução submétrica e Modelos Digitais de Elevação (MDE) como SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*), ALOS (*Advanced Land Observing Satellite*), PALSAR (*Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar*) e ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) tem aumentado as possibilidades analíticas da geomorfologia moderna (GAO et al., 2017; AVTAR et al., 2015; HENGL e EVANS, 2009). Tais recursos, no entanto, apresentam consideráveis limitações acerca da resolução espacial e temporal e acurácia posicional, tornando difícil a interpretação de feições fluviais e a dinâmica do tempo (EVANS et al., 2009; GAO et al., 2017;).

A identificação e mapeamento das menores feições do relevo, tais como ravinas e feições fluviais, isto é, aquelas correspondentes ao sexto nível taxonômico da proposta de Ross (1992), necessitam de fotografias aéreas de alta resolução, combinadas ou não a campanhas de campo para sua identificação e classificação (ROSS, 1992). Neste sentido, novas geotecnologias têm permitido a realização levantamentos planialtimétricos e análise geomorfométrica com alta precisão, por meio de estações totais, sensores aerotransportados ou orbitais óticos e por dados de radar e LiDAR (*Light Detection And Ranging*). No entanto, destaca Oliveira et al. (2017), essas fontes são menos acessíveis e possuem custos operacionais mais elevados.

Com o desenvolvimento de dispositivos de sensoriamento remoto e novas técnicas de mapeamento, os VANT têm sido utilizados para aumentar a eficiência do mapeamento e obter imagens e dados 3D com resolução inédita (GAO et al., 2017; BELLETTi et al., 2017; VILES, 2016). Diversos trabalhos, como Hugenholtz et al. (2013), Marotta et al. (2015), Zanetti et al. (2016), Oliveira et al. (2017) e Hung et al. (2018), avaliam a acurácia dos levantamentos planialtimétricos com VANT. Oliveira et al. (2017) e Rusnak et al. (2017) apresentam resultados satisfatórios, onde a média das diferenças entre as coordenadas tridimensionais (erro padrão) é inferior a 5 cm. Hung et al. (2018) se utilizaram de pontos de controle de solo e baseados no sistema de navegação nativo de um VANT (Phanton 3), obtiveram um erro médio de 29 cm.

Rusnak et al. (2017) acrescentam ainda, que a combinação de imagens obtidas de forma oblíqua e em nadir durante voos fotogramétricos com VANT permite, além do mapeamento da cobertura do solo, a reconstituição de superfícies tridimensionais com resolução superior a 10 cm. Demonstra-se em diversas abordagens que o mapeamento com VANT é mais barato, é

mais acessível operacionalmente e tem densidade de informação espacial igual ao do que o lidar aéreo (RUSNAK et al., 2017; MANCINI et al., 2013).

Trabalhos voltados à obtenção de dados em alta resolução sobre a evolução da paisagem tem se tornado mais frequentes. Este fato pode ser verificado com o número crescente de publicações, desde 2014 em plataformas de literatura científica revisada por pares. Destacam-se trabalhos como: Gao et al. (2017), que realizaram mapeamento para identificar deslocamentos paleossísmicos ao longo da falha Altyn-Tagh, China; Rusnak et al. (2017), que apresentaram uma metodologia para mapeamento paisagístico fluvial de alta resolução com VANT; Bolaños et al. (2021) realizaram cálculos morfométricos e volumétricos do relevo dinâmico de vulcões ativos na Costa Rica; Siebert e Teizer (2014), Marotta et al. (2015) e Silva et al. (2017), que destacaram a aplicabilidade dos VANT para a geomorfometria e para trabalhos que necessitam de detalhamento de dados tridimensionais, como levantamentos topográficos para obras de engenharia, agricultura de precisão e monitoramento ambiental.

Rusnak et al. (2017), Hung et al. (2018) e Oliveira et al. (2017) reconhecem e destacam as limitações dos levantamentos aerofotogramétricos e geração de Modelos Digitais de Terreno (MDT) com as câmeras embarcadas em VANT, pois operam apenas região visível do espectro-eletromagnético (0,4 a 0,7 μm) e captam informações apenas da superfície exposta ou a copa das árvores, construções e objetos. Rusnak et al. (2017) destacam que a interpolação do MDS para MDT não é possível quando a área é coberta por vegetação densa. Estas câmeras estão sujeitas às condições de luminosidade, onde o sombreamento causa ausência de informação e discrepâncias nos modelos gerados. Inclui-se nestas limitações a baixa autonomia de voo e alta sensibilidade às condições atmosféricas, como chuva e rajadas de vento.

O imageamento com VANT é uma técnica baseada em fotogrametria, conceitualmente definida como: arte, ciência e tecnologia de obter informações confiáveis sobre objetos físicos e o ambiente por meio de processos de registro, medição e interpretação de imagens fotográficas e padrões de registros energia eletromagnética radiante e outros fenômenos (Wolf et al., 2014; McGlone e Lee, 2013). Na técnica analógica, consistia-se em capturar informações tridimensionais de características de duas ou mais fotografias do mesmo objeto, tiradas de ângulos diferentes, utilizando geralmente um estereoscópio (Figura 7).

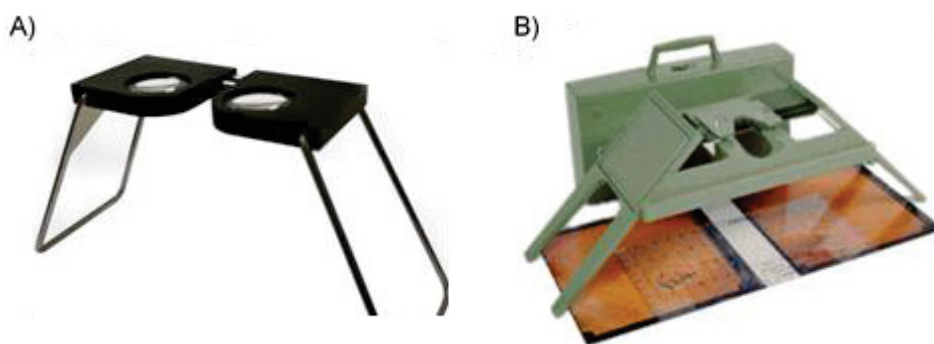


Figura 7 Exemplos de Estereoscópio. A) Estereoscópio de bolso; B) Estereoscópio de Mesa

A ampla disponibilidade de VANT de baixo custo fomentou o desenvolvimento da fotogrametria (CARRIVICK e SMITH, 2018). Atualmente, combinam-se princípios fotogramétricos com conceitos e algoritmos de visão computacional – especificamente a Structure from Motion - Multi-View Stereo (SfM-MVS) – que levaram à avanços significativos na modelagem de superfície 3D a partir de imagens digitais. Especialmente o aumento da automação e integração de todas as etapas do fluxo de trabalho fotogramétrico em pacotes de software fáceis de usar, tornaram a análise fotogramétrica acessível para não especialistas (ABER et al., 2019).

As aplicações SfM ainda são exclusivas e recentes nas geociências, mas produzem nuvens de pontos tridimensionais que permitem a confecção de MDT e MDS (Figura 8) com alta qualidade por um custo financeiro reduzido (CARRIVICK e SMITH, 2018). Os modelos gerados a partir do SfM permitem, além dos produtos já discutidos nesta revisão, mapeamento do tamanho de grãos dos sedimentos (CARBONNEAU et al., 2018), levantamentos batimétricos (DIETRICH, 2016 e 2017), mapeamento da qualidade da vegetação (ZHANG et al., 2019), atividade biológica (PUTTOCK et al., 2015), detecção de alterações geomorfológicas e tem se mostrando eficaz para a compreensão das mudanças dinâmicas dos sistemas fluviais e aquáticos (ABER et al., 2019; RUSNAK et al., 2017).

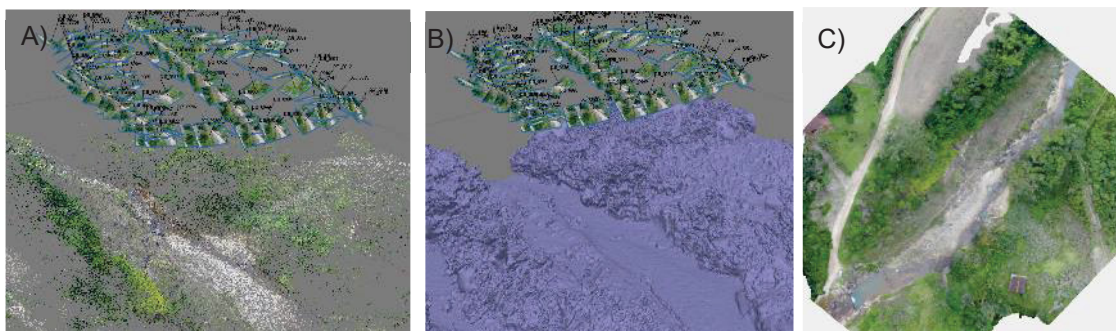


Figura 8 Produtos fotogramétricos obtidos com VANT. A) Nuvem de pontos; B) Modelo Digital de Superfície; C) Ortomosaico
Fonte: o autor (2021)

A coleta aprimorada de dados não só nos permite fornecer respostas mais detalhadas para uma gama mais ampla de questões fundamentais sobre a superfície da Terra, mas também incentiva pesquisadores para elaborar novas perguntas (VILES, 2016). Permite, portanto a investigação com dados de alta resolução para fornecer medições precisas de mudanças no relevo (GAO et al., 2017), inclusive monitoramento pré e pós perturbação (CARRIVICK e SMITH, 2018) e para quantificar a extensão, magnitude e forma de mudança topográfica nos ambientes fluviais em pontos de erosão e seções transversais individuais (HAMSHAW et al., 2017).

2.2.4 Geometria hidráulica e análise de seção transversal

Nos estudos de detalhe sobre geomorfologia fluvial, além das técnicas de mapeamento e classificação do relevo, destaca-se a Geometria Hidráulica, conceito este que vem sendo

amplamente utilizado na literatura geográfica, especialmente em trabalhos voltados à compreensão da dinâmica geomorfológica de cursos d'água, bem como trabalhos voltados à preservação de rios e desenvolvimento de projetos de manejo fluvial (GRISON e KOBİYAMA, 2011; MORISAWA, 1985; FERGUSON, 1986; WILLIAMS et al., 2002; CUNHA, 1995 e MARÇAL, 2013).

O processo fluvial é parte constituinte de um sistema morfogenético, ou seja, possui dinâmica própria e é formado por um conjunto de componentes ou variáveis que são passíveis de assumir magnitudes diversas. Atua ainda exibindo relações mensuráveis que operam simultaneamente e seguindo determinado padrão, dos quais se podem distinguir, medir e correlacionar as variáveis geométricas e de composição (CHRISTOFOLETTI, 1999).

A Geometria Hidráulica tem como uma das principais ferramentas de estudo a análise de seções transversais (perfil transversal), que, segundo Christofolletti (1981), representa uma relação entre a hidráulica e geometria do rio, possibilitando a detecção de processos erosivos e deposicionais associados ao fluxo (MARÇAL, 2013).

Para Gregory e Park (1974) a geometria hidráulica de um canal pode ser utilizada para indicar não apenas as mudanças no leito fluvial, mas também as condições sob as quais tais transformações ocorrem. Ferguson (1986) acrescenta que é possível prever futuras mudanças nas formas e dinâmicas geomorfológicas que dar-se-ão em um determinado rio. As dimensões de um canal são controladas pelos processos erosivos e deposicionais, assim, a forma do leito em uma seção transversal corresponde ao reflexo do ajustamento à vazão (CHRISTOFOLETTI, 1981).

A análise das seções transversais nos sistemas fluviais é de grande importância prática para: planejamento ambiental e análise da influência antrópica sobre a morfologia do canal; dimensionamento de obras de engenharia e a construção de margens estáveis em canais retificados; monitoramento de fenômenos naturais; estimativas de descarga líquida; estudos que utilizam modelagem matemática (FERNANDES et al., 2001; OLIVEIRA, 2012; GRISON e KOBİYAMA, 2011).

A seção transversal de um canal fluvial se trata da linha imaginária que intersecta um plano vertical com o vale do rio, perpendicular ao leito. Conforme explica Cunha (2009), os métodos de medição variam de acordo com o tamanho do rio e com o propósito da pesquisa, mas consistem na obtenção de valores que representam variações da elevação na linha transecta ao canal e em relação a um determinado ponto (Figura 9). Tais valores podem ser obtidos por meio de medições (levantamentos) em campo com auxílio de instrumentos como régua, ecobatímetro, nível topográfico e estação total.

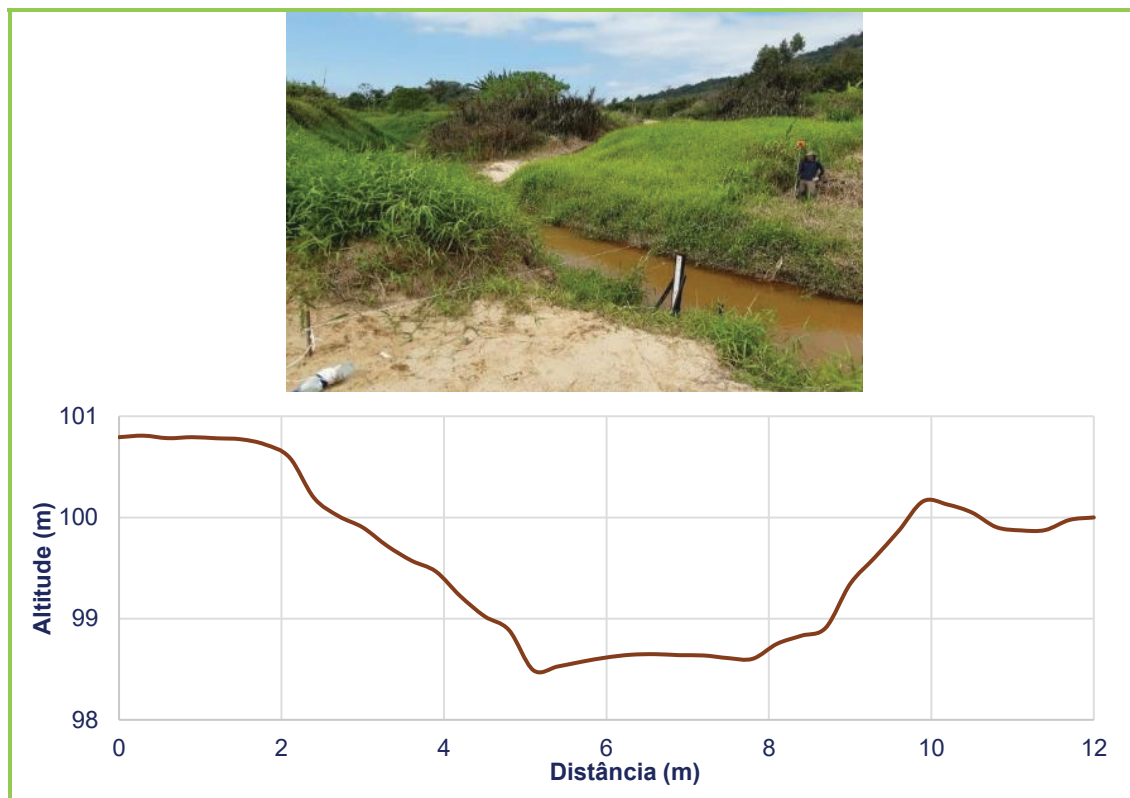


Figura 9 Levantamento de uma seção transversal com estação total. Local: Seção 03 do rio Jacaré. (Feito pelo Autor)

Fernandez et al. (2001) cita que a partir dos valores obtidos em um levantamento de seção transversal, as seguintes variáveis podem ser analisadas: largura, profundidade média, área, índice de forma do canal, área molhada, largura superficial, perímetro molhado e raio hidráulico.

Os critérios para definição do local de instalação de uma seção podem variar de acordo com o propósito do estudo ou monitoramento (ALVES, 2005; CAMPOS et al., 2008). Em trabalhos de monitoramento hidrológico e hidrometria, por exemplo, o local de instalação de uma seção transversal deve ser acessível, com margens estáveis, com trecho retilíneo e distante da interferência de objetos, detritos ou feições causadoras de perturbação no fluxo hídrico, tais como pilares de pontes, corredeiras e confluências (STEVAUX e LATRUBESSE, 2017). Fernandez et al. (2001) comentam que frente às dificuldades de estabelecer o limite superior da seção, pode-se utilizar nível de descarga de margens plenas como plano operacional. O nível de margens plenas, segundo Wolman e Leopold (1957), corresponde a um plano horizontal no qual a descarga líquida preenche na medida justa a seção do canal fluvial antes de ultrapassar em direção à planície de inundação.

A respeito de monitoramentos de processos evolutivos, destaca-se que a sobreposição de sucessivos levantamentos de seção transversal representa um bom método para avaliar as mudanças laterais dos canais e a erosão das margens, bem como para produção de índices que apontam às tendências evolutivas do canal (OLSON-RUTZ e MARLOW, 1992; FERNANDEZ et al., 2001; CUNHA, 2012; MARÇAL, 2013).

Fernandez et al. (2001) e Marçal (2013) utilizam a sobreposição de sucessivos levantamentos topobatimétricos para analisar as mudanças em seções transversais. Para tanto, utilizaram análise estatística descrito por Olson-Rutz e Marlow (1992), que, por sua vez, apontam aos seguintes índices:

- *Índice de Forma do Canal;*
- *Variação do Residual da Área da seção;*
- *Variação do Total da Área da seção.*

Fernandez et al. (2011) discorrem que a contribuição mais relevante dos parâmetros de Olson-Rutz e Marlow (1992) é a possibilidade de discriminar a porcentagem da área da seção afetada pela erosão e deposição entre dois levantamentos consecutivo e o fornecimento de detalhes precisos das irregularidades do leito e das margens.

3. DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo da presente pesquisa está localizada na bacia hidrográfica do rio Jacareí, a qual possui área total de 40,17 km². A bacia abrange porções dos municípios de Paranaguá e Morretes, e se encontra entre a Serra da Prata (Serra do Mar) e a baía de Antonina. Encontra-se na linha de contato do complexo cristalino com a planície litorânea quaternária e terrenos de aluviões terrestres (BIGARELLA, 1946).

O rio Jacareí nasce na Serra da Prata, que possui 1.470 metros de altitude. Ele apresenta um desnível de 1.442 metros até a planície na cota de 28 metros acima do nível do mar. A extensão do rio soma cerca de 9,5 km de comprimento, passa por trechos retificados e pela rodovia BR 277 até desaguar na foz do rio Nhundiaquara, na baía de Antonina. Na presente pesquisa, a área de estudo selecionada corresponde ao trecho da planície entre a rodovia BR 277 e a ponte submersa da estrada de acesso, sendo esta a área alvo para realização dos experimentos e análises (Figura 10).

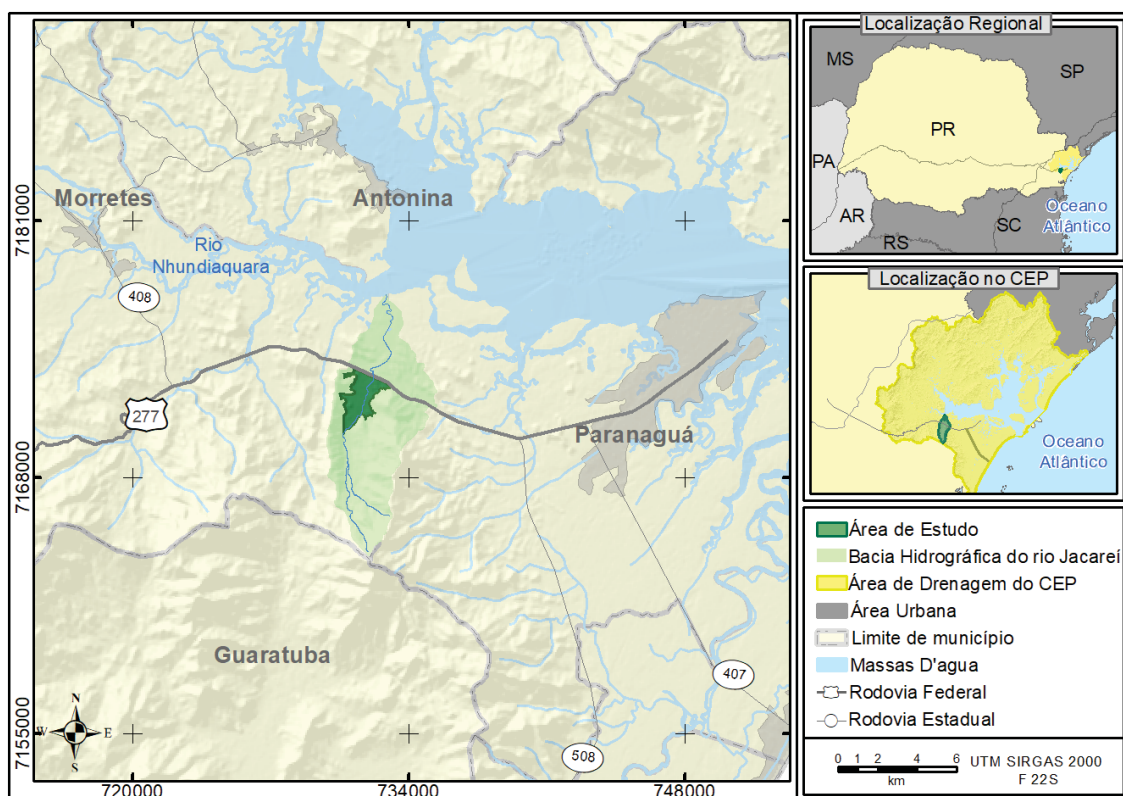


Figura 10 Localização da área de estudo

A bacia hidrográfica do rio Jacareí compreende dois grandes compartimentos geomorfológicos: Serra do Mar e Planície Litorânea (BIGARELLA et al., 1978). A planície do rio Jacareí está inserida no contexto geomorfológico da planície litorânea, que, segundo Bigarella (1946), se desenvolveu através de ingressões marinhas que penetraram os vales adjuntos à Serra do Mar. De acordo com a caracterização apresentada por Bigarella et al. (1978), é constituída de formações arenosas, paludais terrestres e manguezais, apresentando correspondência aos padrões que definem a planície litorânea paranaense.

O clima na área de estudo é subtropical, com estações bem definidas, ausência de estação seca e chuvas bem distribuídas, sendo mais expressivas nos meses de verão

(GOUDARD e PAULA, 2016). De acordo com a série histórica de dados (1986-2015) da estação 2548049, localizada na Colônia Santa Cruz, bacia hidrográfica adjacente a do Jacareí, a precipitação média anual é 2051 mm. Os meses mais chuvosos, janeiro, fevereiro e março, apresentam precipitação média de, respectivamente, 312mm, 280mm e 249mm, sendo 17, 14 e 13 a média de dias chuvosos (Figura 11). Não raramente, nos meses mais úmidos, são registrados eventos prolongados de chuvas intensas, que culminam em episódios de movimentos de massa (GOUDARD e PAULA, 2016; ALMEIDA e CARNEIRO, 1998). Os meses com menores índices pluviométricos são junho, julho e agosto, com média de precipitação de 89mm, 99mm e 77mm. A média de dias úmidos é, respectivamente, 8, 8 e 7 dias.

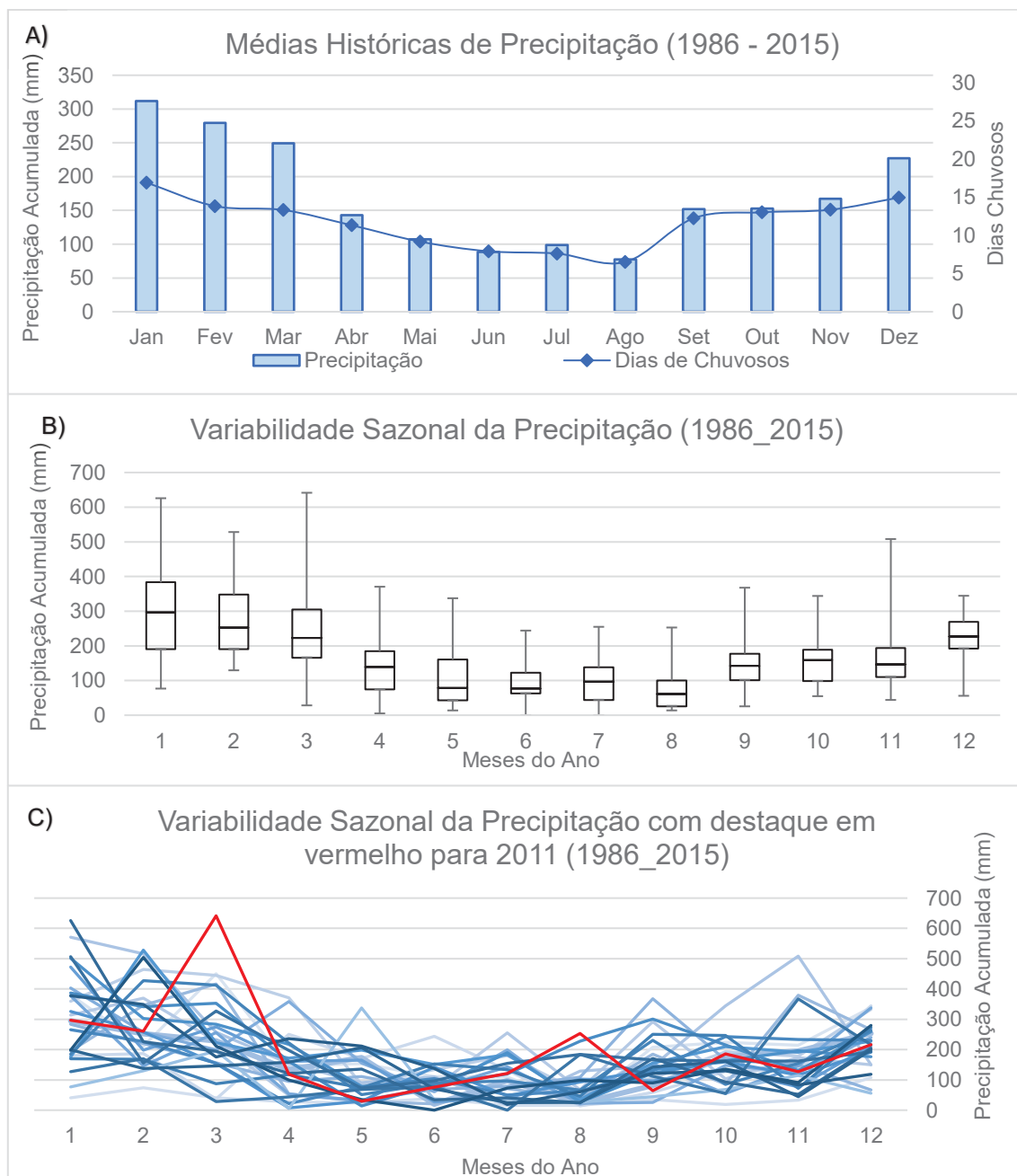


Figura 11 A) Médias históricas de precipitação, B) variabilidade sazonal de precipitação entre os anos 1986 e 2015. C) Destaque ao ano 2011 na variabilidade sazonal. Dados da estação 2548049 (ANA) na bacia hidrográfica do rio Santa Cruz. Organização: O autor.

Fonte: Águas Paraná (2020)

A Figura 11B exprime a variabilidade da precipitação mensal ao longo da série histórica por meio de um gráfico *box plot*, evidenciando que, apesar da forte característica sazonal do clima na área de estudo, existem períodos atípicos de seca ou chuvas mais intensas. A Figura 11C exprime a variabilidade de precipitação ano a ano na série histórica, com destaque em vermelho para 2011, ano em que ocorreram movimentos translacionais e corridas de lama com detritos na Serra da Prata, incluindo a bacia do rio Jacareí e do rio Santa Cruz (SILVEIRA et al., 2013). A precipitação acumulada no mês de março foi de 642mm, maior volume registrado na série histórica observada,. Destaca-se ainda que 575mm foram acumulados em apenas 72 horas.

Em decorrência deste evento extremo, a rodovia BR 277, que cruza transversalmente a planície da bacia hidrográfica do rio Jacareí, atuou como barreira para grande quantidade de lama e detritos carreados pela força da água. Estes materiais ficaram retidos e se acumularam na planície e na passagem o rio Jacareí sobre a ponte da rodovia, a qual foi rompida na ocasião. Para as comunidades atingidas, sobretudo a comunidade Floresta, ocorreram grandes prejuízos. Além da perda de vidas humanas, houve danos materiais que até a presente data não foram totalmente recuperados, como a ponte que dá acesso às porções mais elevadas da bacia, a escola da comunidade e algumas residências.

Vanhoni e Mendonça (2008) apontam que a Serra do Mar atua como uma barreira para o avanço de massas de ar oriundas do oceano, favorecendo a concentração de umidade e ocorrência de chuvas orográficas nas encostas (MAACK, 2012), fazendo com que o litoral paranaense tenha uma média pluviométrica de 2.435 mm/ano (VANHONI e MENDONÇA, 2008). Fato este que, segundo Angulo et al. (2006), caracteriza a região com acentuada progradação, frequentes transbordamentos dos corpos d'água, bem como carreamento de grande quantidade de sedimentos para as planícies, leitos dos rios e para o estuário.

O processo evolutivo do domínio da Serra do Mar é intimamente relacionado a seus processos naturais. De acordo com Angulo (1992) e Silveira et al. (2014), a elevada amplitude altimétrica, declividade acentuada e os elevados índices pluviométricos condicionam os processos denudacionais e morfoesculturais da Serra do Mar. Estes fatores conferem à região elevada suscetibilidade geopedológica (PAULA, 2016), dando origem a solos pouco desenvolvidos e com litologia exposta em diversas áreas (SILVEIRA et al., 2013). Em função disso, ocorrem Neossolos Litólicos e Organossolos Fólicos rasos próximos às cotas mais elevadas da Serra da Prata. Nas amplas encostas da bacia, há predomínio de solos pouco espessos, formados por Cambissolos e associações com Neossolos e Argissolos. Na planície, ocorrem solos hidromórficos, especialmente Cambissolos Flúvicos nas adjacências do rio Jacareí e Gleissolos Hápicos próximos às encostas (MINEROPAR, 2017).

O terço superior da vertente do rio Jacareí, correspondente ao afloramento do Escudo Cristalino, apresenta maior declividade, onde os processos esculturais atuam com intensa participação dos escorregamentos. Esta porção apresenta topos alongados, cristas com vertentes predominantemente retilíneas e vales em “V” encaixados. Neste trecho, as vertentes

apresentam elevada energia, tendendo a apresentar convergência de fluxo e corrida de detritos durante eventos pluviométricos intensos (OKA-FIORI et al., 2006; SILVEIRA et al., 2013).

Segundo Silveira et al. (2013), os fluxos convergentes dessas áreas constituem-se de transporte de blocos de rocha, solo e troncos de árvores. Os detritos mais grosseiros tendem a se depositar no início da planície, formando cones de detritos, enquanto os materiais finos como argila, silte e areias, depositam-se ao longo da planície aluvial.

As áreas inferiores da vertente correspondem a depósitos de colúvio, com formação de cones de detritos e leques aluviais, onde ocorre a acumulação de sedimentos provenientes das porções mais elevadas da bacia. Nessa área, que naturalmente possui menor suscetibilidade erosiva e predomínio de sedimentação, o processo de pedogênese, ainda que pouco avançado, se desenvolve com maior facilidade sobre antigos depósitos marinhos pleistocênicos, que, nas áreas de encosta (BIGARELLA, 1946; SUGUIO, 2003 e SILVEIRA et al., 2013), formam, portanto, solos alóctones.

Nas amplas áreas de encosta predomina vegetação em estágio médio e avançado de desenvolvimento. A ocorrência de vegetação pioneira e em estágio médio de regeneração se dá principalmente na vertente da Serra da Prata, nas proximidades da estrada de acesso e nas cicatrizes originadas em eventos pretéritos. A vegetação é constituída por Floresta Ombrófila Densa de encosta, com as formações Submontana, Montana e Altomontana (BLUM e RODERJAN, 2007). Na planície ocorrem áreas com formação vegetacional pioneira de influência fluvial, tais como taboas, gramíneas e várzeas. As áreas secas e ou drenadas artificialmente são utilizadas para o uso antrópico, e, atualmente, compreendem o cultivo de hortaliças.

Na porção da Serra da Prata drenada pela bacia do rio Jacaré, ocorrem baixos níveis de perturbação humana e elevada biodiversidade. Esta região é considerada área prioritária para a conservação (MMA, 2007) e manancial de abastecimento. Encontra-se atualmente protegida pelo Parque Nacional Saint-Hilaire/Lange (BLUM, 2006; MMA, 2020).

Na planície do rio Jacaré (Figura 12), os aspectos econômicos e culturais se assemelham a outras regiões rurais da área de drenagem da baía de Paranaguá, onde se nota o predomínio de pequenas propriedades, com modestos níveis de desenvolvimento econômico, nas quais, em geral, não são adotadas práticas conservacionistas de cultivo (PAULA, 2010). Em virtude disso, ocorre, além dos baixos níveis de proteção do solo, o uso expressivo de fertilizantes. Paula et al. (2006) salientam que o manejo inadequado destas áreas tem sido a principal causa da degradação ambiental, cujas consequências podem ser a aceleração dos processos erosivos, poluição hídrica, contaminação de sedimentos, agravamento das inundações e avanço do desmatamento.



Figura 12 Fotografia aérea da área de estudo.

Fonte: o autor (2019)

Sabe-se que nem todos os rios mostram a mesma forma e extensão de ajuste em resposta à perturbação humana (RUTHERFURD, 2000). Todavia, há um interesse estratégico na escolha da área de estudo, pois ela concentra uma gama de características que influem no contexto da dinâmica hídrica litorânea. A primeira delas diz respeito a sua representatividade no contexto da Serra do Mar no que tange à sua fragilidade, fato este que fica evidente em face do evento registrado em 2011 e das características geomorfológicas que apontam à elevado potencial de suscetibilidade geopedológica à disponibilização de sedimentos. Neste sentido, a bacia do rio Jacaré torna-se uma importante contribuinte para o assoreamento do estuário adjacente.

Outra característica refere-se ao contexto dos rios de planícies litorâneas sujeitos a obras de retificação. Assim como demonstrado em trabalhos como Cunha (2012) e Assumpção e Marçal (2012), existem problemas inerentes às obras de retificação e desassoreamento realizadas em rios de ambientes cujos processos geomorfológicos são naturalmente acentuados (**Erro! Fonte de referência não encontrada.1**). Inclui-se também que, em face das cicatrizes dos deslizamentos ocorridos em 2011 e do estágio inicial de regeneração da vegetação nestes locais, a bacia do rio Jacaré apresenta-se com um significativo potencial de produção e disponibilização de sedimentos para o estuário.

4. MÉTODOS E PROCEDIMENTOS

Nesta seção do trabalho estão descritos os procedimentos metodológicos, adotados para desenvolvimento da presente pesquisa. Destaca-se que a metodologia se baseia na obtenção e análise de dados primários. São analisadas as feições fluviais em áreas amostrais por meio de mapeamento geomorfológico de detalhe e análise quantitativa da geometria de seções transversais.

Primeiramente, apresenta-se os critérios adotados para o desenvolvimento da proposição metodológica de mapeamento geomorfológico das feições fluviais identificadas a partir das imagens de VANT (Objetivo 1). Em seguida, discorre-se sobre os procedimentos adotados para a associação de topografia e fotogrametria com VANT na realização de monitoramento de processos fluviais (Objetivo 2). Assim, a proposição de mapeamento foi integrada ao monitoramento de processos fluviais no rio Jacareí. Por fim, a identificação das mudanças geomorfológicas, foram verificadas a partir da análise dos sucessivos levantamentos de dados topográficos e fotogramétricos.

A síntese metodológica é ilustrada no fluxograma representado na Figura 13.

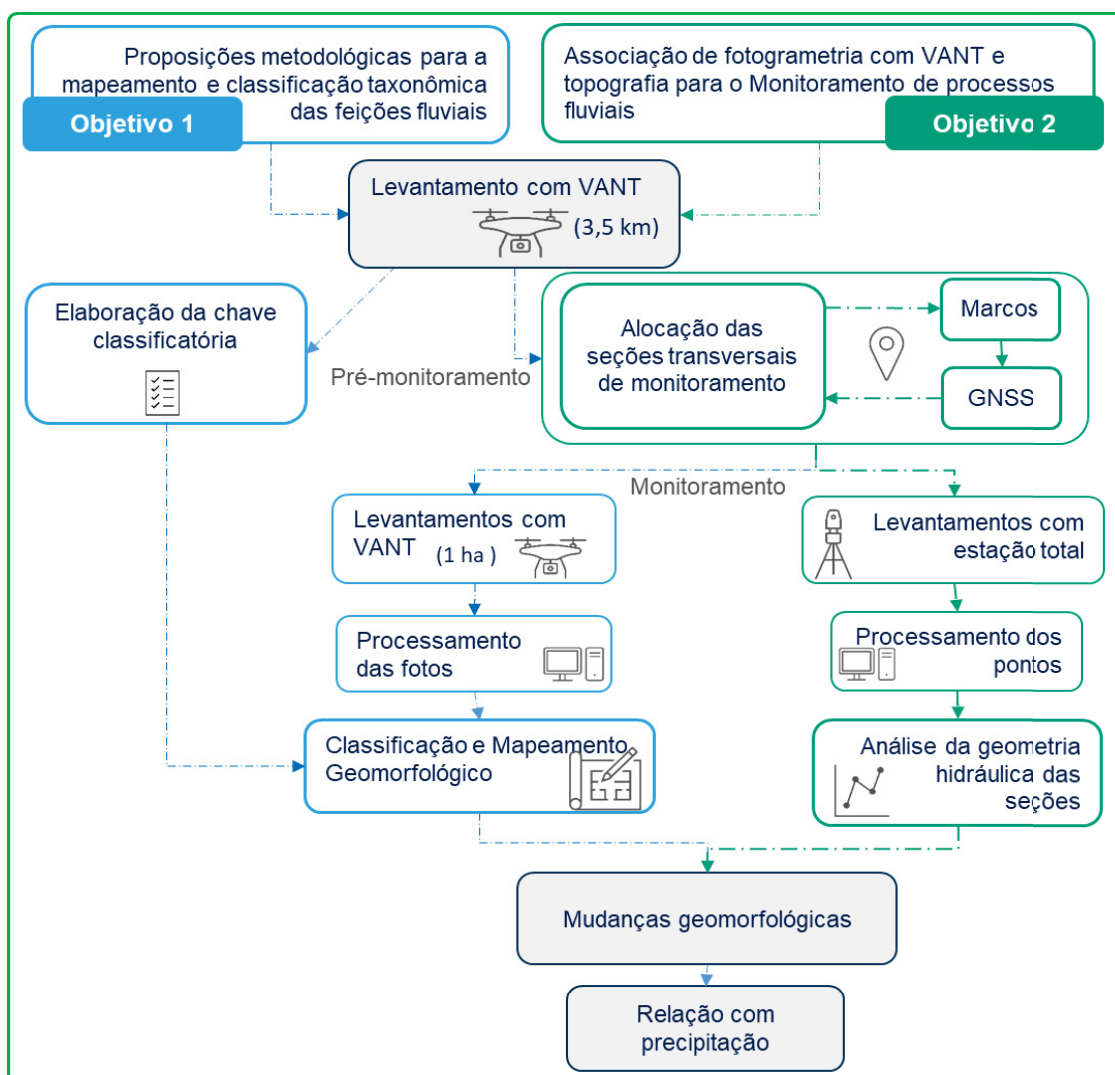


Figura 13 Fluxograma metodológico

4.1 Proposições para mapeamento geomorfológico fluvial de detalhe

Correspondendo ao primeiro objetivo específico da pesquisa, este subcapítulo discorre sobre os critérios adotados para a elaboração da proposição metodológica de mapeamento geomorfológico de feições fluviais identificadas a partir das imagens de altíssima resolução obtidas por VANT.

O procedimento inicial para o mapeamento das feições foi a obtenção de imagens de alta resolução com VANT. Com base nas imagens do primeiro voo experimental, foi possível verificar uma grande quantidade e diversidade de informações relacionadas às feições fluviais. Frente a tal diversidade e diante das limitações para a compatibilização com as atuais propostas de classificação e mapeamento do relevo, foi necessário criar, no âmbito desta pesquisa, uma nova proposta de classes e legenda das microfeições fluviais.

A base teórica e metodológica para elaboração da chave classificatória foi amparada nas considerações de Riccomini et al. (2009), Silva e Santos (2015), Belletti et al. (2017) e Stevaux e Latrubesse (2017). Como estrutura classificatória preconizou-se o detalhamento em níveis taxonômicos, baseados na tipologia de relevo (ROSS, 1992; PELECH et al., 2019). Vale mencionar que o trabalho de Silva e Santos (2015), que caracterizou e mapeou com sexto nível categórico as unidades geomorfológicas da bacia do rio Pequeno no litoral paranaense, o fez com base em imagens com resolução espacial de 2,5 metros, obtidas do satélite SPOT5. Na presente pesquisa, portanto, há maior nível de detalhamento, pois são utilizadas imagens de VANT com resolução de 2 centímetros.

Com base nas proposições discutidas por Silva e Santos (2015), Riccomini et al. (2009) e no detalhamento do sexto nível categórico da classificação taxonômica de Jurandir Ross (ROSS, 1992), elaborou-se a chave classificatória para paisagens fluviais, na qual é designado, primeiramente, o nível referente ao processo dominante à feição e, em seguida, a forma da feição. Na sequência, relaciona-se os fatores de controle da feição: estrutura e substrato. A estrutura classificatória foi projetada para ser flexível e adaptável de acordo com especificidades locais, sendo ela útil para compreender as interações de processos e formas em escalas de detalhe.

A aplicação da proposta de chave classificação e mapeamento foi realizada nas áreas amostrais das 4 seções transversais selecionadas no presente trabalho, em trechos da planície do rio Jacareí. Cada uma delas possui área de 1 hectare. Conforme sugerido por Binda e Fernandez (2011), Cunha (2012), Marçal (2013), para permitir a comparação temporal, identificar mudanças geomorfológicas e processos dominantes, foram executados sucessivos levantamentos de campo, no âmbito desta pesquisa foram empregados voos fotogramétricos semiautomatizados em cada campanha de campo.

Com sobrevoos semiautomatizados, ao longo das campanhas de monitoramento, foram obtidas aproximadamente 1600 fotografias aéreas, em nadir e oblíquas em cada voo. O processamento para confecção do ortomosaico foi realizado no software *Agisoft Metashape Professional* (Versão 16.4 – Licença Educacional, Centro de Pesquisa Aplicada em Geoinformação - CEPAG). Este software permite a confecção dos seguintes produtos fotogramétricos: nuvens de pontos rala e densa, MDS colorido e ortomosaico.

Em geral, os procedimentos metodológicos para obtenção das imagens do VANT seguiram as proposições discutidas por Rusnák et al. (2017), que sugere: reconhecimento do

local a ser mapeado; trabalho de campo pré-voo; planejamento e execução do voo; verificação e processamento de dados aéreos e, por fim, o mapeamento das feições fluviais.

A explicação sobre os procedimentos técnicos e metodológicos adotados nos levantamentos com VANT é detalhado subcapítulo 4.2.4 (Fotogrametria com VANT). Enquanto a aplicação da chave classificatória, no item 4.2.2 (Monitoramento das seções transversais).

4.2 Monitoramento e Análise dos Processos Geomorfológicos Fluviais

Este subcapítulo discorre sobre a segunda etapa da pesquisa, que consiste na obtenção, processamento e análise de dados topográficos e fotogramétricos, em conjunção com dados de precipitação. São esclarecidos os procedimentos adotados para a realização do monitoramento e análise dos processos fluviais, inclui a preparação e realização das atividades de campo (campanhas) para obtenção dos dados, a análise estatística dos dados topográficos, processamento das imagens do VANT e fotointerpretação, por fim, sobre a obtenção dos dados pluviométricos. Na pesquisa, foram realizadas 13 campanhas de campo, das quais 4 na etapa de pré-monitoramento, 6 de monitoramento e 4 complementares, conforme expressado no Quadro 3.

Quadro 3 Cronograma das campanhas de campo

<i>Etapa</i>	<i>Campanha</i>	<i>Data</i>	<i>Objetivo</i>
1ª Etapa	1ª Campanha	22/05/2019	• Reconhecimento dos aspectos gerais da bacia • Contato com moradores
	2ª Campanha	03/07/2019	• Imageamento aéreo na extensão do rio Jacaré
	3ª Campanha	08/08/2019	• Definição do local das seções transversais • Caracterização das áreas amostrais
	4ª Campanha	05 e 06/10/2019	• Implantação dos marcos geodésicos nas seções transversais.
2ª Etapa	1ª Campanha	11 e 12/10/2019	• Levantamentos topográfico da seção • Imageamento aéreo das seções (voos de 1 ha) • Imageamento aéreo na extensão do rio Jacaré
	2ª Campanha	09/01/2020	• Levantamentos topográfico da seção • Imageamento aéreo das seções (voos de 1 ha)
	3ª Campanha	14/03/2020	• Levantamentos topográfico da seção • Imageamento aéreo das seções (voos de 1 ha)
	4ª Campanha	08/06/2020	• Levantamentos topográfico da seção • Imageamento aéreo das seções (voos de 1 ha)
	5ª Campanha	06/11/2020	• Levantamentos topográfico da seção • Imageamento aéreo das seções (voos de 1 ha)
	6ª Campanha	24/01/2021	• Levantamentos topográfico da seção • Imageamento aéreo das seções (voos de 1 ha)
	Campanha Complementar	09/02/2021	• Imageamento aéreo na extensão do rio Jacaré após evento pluviométrico
	Campanha Complementar	14/02/2021	• Repetição do voo anterior para correção de distorções
	Campanha Complementar	24/03/2021	• Rastreio GNSS de 4 pontos (90 min cada)
	Campanha Complementar	07 e 08/06/2021	• Rastreio GNSS de 6 pontos (90 min cada)

4.2.1 Alocação das seções transversais.

Esta etapa compreende o pré-monitoramento da pesquisa. Trata dos critérios adotados para escolha dos locais de monitoramento e dos procedimentos para instrumentalização das seções transversais. Foram definidas áreas de amostragem com aproximadamente 1 hectare (polígono de 100m x 100m), cuja seção transversal permanente está localizada no centro do polígono. Os critérios para seleção destas áreas foram:

- Ter sido afetada pelas corridas de lama e detritos do evento pluviométrico de março de 2011;
- Estar sujeita à ocorrência de processo acentuado de deposição ou erosão;
- Trecho passível de obras de retificação e desassoreamento para mitigação de inundações;
- Local acessível para monitoramento e uso dos equipamentos estação total, GPS e VANT;
- Acesso autorizado pelo proprietário.

Desta forma, foram excluídas áreas com patamares mais elevados, terraços e áreas montanhosas. Com base no imageamento longitudinal com VANT, foram preliminarmente identificadas 08 áreas potenciais. Após verificação em campo, 03 seções foram descartadas e 05 foram selecionadas. Destas, 04 foram definidas como áreas amostrais permanentes e 01 expedita, localizada a jusante da rodovia BR 277 (Figura 14).

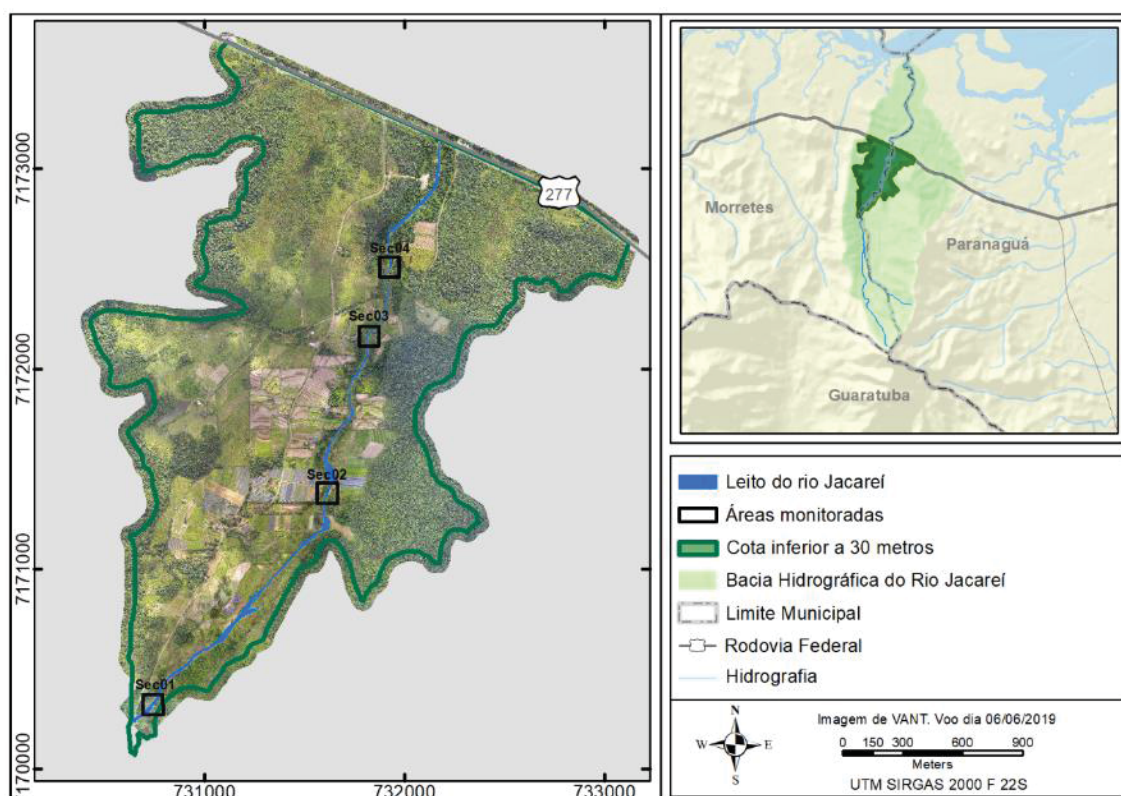


Figura 14 Mapa da Localização das áreas monitoradas com VANT e estação total na planície do rio Jacaré

Com o intuito de estabelecer um referencial de nível altimétrico e pontos de controle para os georreferenciamentos dos perfis e dos produtos cartográficos, foram implantados 08 marcos geodésicos nos vértices de cada seção, com exceção seção 03, onde foi utilizado um marco pré-existente, com base de concreto e medidas de 30mx30m (Figura 15), instalados pela empresa EnvEx Consultoria. Buscou-se instalar os marcos em áreas estáveis e não afetadas diretamente por processos fluviais.



Figura 15 Marco geodésico pré-existente na seção 03.

Os marcos foram implantados de acordo com os padrões definidos pelo do Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária para indicação de vértices em georreferenciamentos de imóveis rurais (INCRA, 2013). Trata-se de marco de material sintético, resistente ao fogo, em forma de tronco de pirâmide, com as dimensões 8 x 12 X 50 cm, que foram enterrados em covas de 40 cm, concretados com uma base circular de 25 cm e, posteriormente, pintados conforme Figura 16.

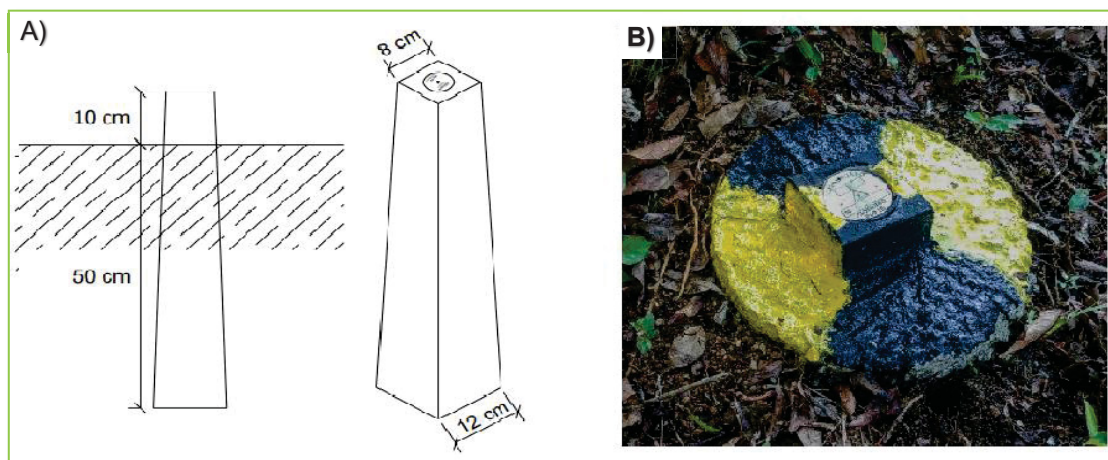


Figura 16 Padrão de marco utilizado. A) Modelo de marco indicado pelo manual (INCRA, 2013). B) Foto de marco implantado na área (O autor, 2020)

Por oportuno, destaca-se que a materialização das seções transversais com marcos geodésicos proporciona, além dos pontos de controle para eventuais georreferenciamentos, valiosas informações sobre as mudanças na morfologia do canal em uma bacia hidrográfica. Não obstante, são de baixo custo, fácil instalação e oportunizam trabalhos futuros.

Para garantir o alinhamento e distribuição equidistante dos pontos cotados no levantamento topográfico, definiu-se o uso de um cabo-guia entre as extremidades do perfil transversal. O cabo-guia foi graduado a cada 30 cm com tinta permanente (Figura 17A). A ancoragem (Figura 17B) do cabo foi feita em vergalhões fixados no solo em cada margem do rio, alinhados e posicionados a aproximadamente 1,5 metros dos marcos geodésicos.

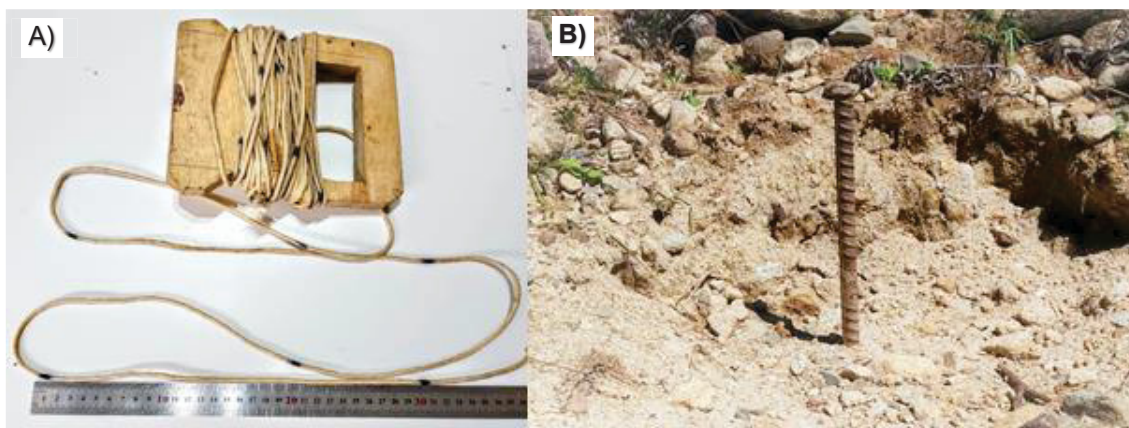


Figura 17 Instrumentos para alinhamentos dos levantamentos. A) Guia graduada a cada 30 centímetros para indicação do posicionamento do prisma. B) Ponto de Ancoragem para o cabo-guia dos levantamentos topográfico

A determinação das coordenadas precisas dos marcos geodésicos e dos pontos de orientação da estação total (base e ré) foi realizada por meio de posicionamento relativo estático com 90 minutos e receptor GNSS (*Global Navigation Satellite System*) de dupla frequência (L1 e L2), modelo GPS900 da *Leica Geosystems* (Figura 18), cedido pelo LABTOPO (Laboratório de Topografia) da Universidade Federal do Paraná.



Figura 18 Antena receptora do GNSS sendo utilizada na seção 04

O pós-processamento dos pontos rastreados foi realizado por meio da técnica do Posicionamento por Ponto Preciso (PPP). Este serviço permite a obtenção de coordenadas de precisão no Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS2000), bem como a associação do ponto coletado a um ponto da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC) (IBGE, 2017), no qual foi empregado o ponto existente no Centro Politécnico da UFPR. O quadro 4 apresenta a relação dos pontos rastreados e processados.

Quadro 4 Relação dos pontos e coordenadas rastreadas e associação com a orientação dos levantamentos topográficos.

Seção	Tipo	Observação	Ponto	N	E	H
Sec01	Ré	Ré	4	7.170.337,68	730.728,88	26,04
Sec01	Base	Base	5	7.170.328,95	730.730,61	26,95
Sec02	Base	Base em out/19	3	7.171.380,94	731.592,42	13,67
Sec02	Base	Base em jan, mar, jun, nov e jan.	6	7.171.371,41	731.624,31	12,37
Sec02	Ré	Ré em jan, mar e jun.	12	7.171.375,87	731.627,46	12,28
Sec03	Ré	Ré	2	7.172.176,95	731.795,34	11,34
Sec03	Base	Base	7	7.172.163,49	731.799,69	10,65
Sec04	Base	Base em out/19 e jan/20	1	7.172.515,91	731.939,27	9,98
Sec04	Base	Base em mar, e jun,	8	7.172.519,45	731.916,76	10,77
Sec04	Ré	Ré em mar e jun	11	7.172.530,17	731.906,75	10,12

A respeito da utilização destes pontos, importa esclarecer que, além da função principal de determinar as coordenadas precisas dos marcos geodésicos e de orientação da estação total, esperava-se também, utilizá-los como pontos de controle para o imageamento das seções com o VANT. Entretanto, a quantidade de pontos levantados para este fim se mostrou insuficiente.

Fora instalados marcos geodésicos também na área amostral expedita (seção 05), localizada a jusante da rodovia BR 277. Tendo em vista o tempo para execução de cada campanha, a menor probabilidade de detectar mudanças no leito do rio durante o desenvolvimento da presente pesquisa e a impossibilidade de voos com VANT na área, não foram coletados os pontos dos marcos com GNSS. Esta seção ficou definida, portanto, como alternativa, onde seriam realizados apenas levantamentos esporádicos para registro documental a respeito das características atuais do rio.

4.2.2 Monitoramento das seções transversais

Por meio de levantamentos topográficos periódicos foram obtidos os valores de profundidade e distância ao longo dos transectos. Foi utilizada a estação total, modelo TPS 400, fabricada pela empresa *Leica Geosystems*, disponibilizados pelo LABTOPO (Laboratório de Topografia) da Universidade Federal do Paraná.

O levantamento topográfico se iniciou com o estacionamento da Estação Total sobre o marco geodésico definido como base. Foram adotadas como referência coordenadas arbitrárias de 100 metros para os valores de x, y e z do plano cartesiano ($x=100$, $y=100$ e $z=100$). Posteriormente, estes valores foram georreferenciadas a partir das coordenadas GNSS.

A orientação do levantamento foi realizada com o equipamento apontando zero grau na *ré* e os pontos obtidos por irradiação, começando na *vante* (lado oposto do rio) e terminando próximo a *base*, perfazendo uma linha reta, perpendicular a um cabo-guia, fixado nos pontos de ancoragem (Figura 19).



Figura 19 Levantamento topográfico de seção transversal, seção 04

Definida a orientação da ET (estabelecida a *base*, *ré* e *vante*) foi realizada a irradiação dos pontos através de caminhamento com o prisma, posicionando-o paralelo aos pontos graduados na guia e tocando o leito. Foram realizadas seis campanhas de monitoramento entre outubro de 2019 e janeiro de 2021 para o levantamento das seções transversais, perfazendo 19 seções transversais conforme serão demonstradas nos resultados. Inicialmente foram previstas campanhas de monitoramento trimestrais. Devido à pandemia de SAR-SCOV-2, ocorrida no período desta pesquisa, algumas das campanhas de campo não puderam ser realizadas nos meses pré-estabelecidos.

Os dados obtidos em cada levantamento (arquivos .tcl) foram baixados através do software *Posição*¹, no LABTOPO. A edição e cálculo das coordenadas foram realizados no software *TopoCalc*, versão 1.0.0.1 (novembro de 2019), desenvolvido e disponibilizados pelo Prof. Dr. Leonardo Ercolin Filho. Os dados foram exportados para um formato compatível com planilha de cálculo (arquivo .csv) e, por fim, convertidos para .xls (Excel) e .shp (ArcGIS), permitindo as análises estatísticas e representações gráficas.

¹ Software *Posição*: sistema de automação topográfica de direitos reservados ao Grupo Hexagon.

4.2.3 Análise da geometria das seções

Neste subcapítulo do trabalho, descreve-se a aplicação de técnicas para análise estatística das variações na forma e processos de um canal. Com base no conceito de Geometria Hidráulica (LEOPOLD e MADOCK, 1956) e da análise discutida por Olson-Rutz e Marlow (1992) e empregada por Fernandez et al. (2001) e Marçal (2013), analisa-se a dinâmica erosiva e deposicional do rio Jacaré. Tal análise é útil para a apresentação de índices que quantificam a variação geométrica das seções transversais ao longo do monitoramento.

Com base no arquivo .csv, gerado no *TopoCalc*, foram gerados dois novos arquivos: .xls, para tabulação em Excel (Microsoft Office 365), e o shapefiles (.shp), para geoprocessamento no ArcGIS. Em Excel, foram utilizados os dados medidos de distância, cota e altura em relação ao nível de margens plenas. Através da expressão (1) foi verificada a colinearidade entre os pontos de cada levantamento, onde, o limite entre os pontos de um levantamento com outros é de -20 a 20 cm.

$$Col = Px_{lr} - Px_{lap} \quad (1)$$

Onde: *Col* é a Colinearidade; *Px* corresponde a um ponto qualquer no levantamento; *lr* o levantamento de referência e *lap* o levantamento posterior ou anterior. Quando o ponto “X” estiver dentro do limite estabelecido, considera-se colinear, quando ultrapassa o limite, o ponto poderá ser considerado colinear com ponto adjacente. Espaços vazios, maiores que 40 cm e pontos duplicados, ou muito próximos, causam não colinearidades. Diante destas ocorrências foi feita a exclusão do ponto repetido ou interpolação de um novo ponto para preenchimento do espaço. O ponto interpolado (*Pi*) corresponde ao valor médio entre o ponto anterior e posterior, somado ao ponto anterior, conforme expressão (2).

$$Pi = \frac{P_{post} - P_{ant}}{2} + P_{ant} \quad (2)$$

Onde: *Ppost* e *Pant* correspondem a ponto posterior e ponto anterior.

Após a tabulação e correção dos dados dos sucessivos levantamentos topográficos, os valores foram analisados conforme proposições de Olson-Rutz e Marlow (1992).

Índice de Forma do Canal (F): corresponde a razão entre ao valor (metros) da extensão das margens plenas e a profundidade média na seção transversal:

$$F = \frac{W}{D} \quad (3)$$

Onde **W** é a largura do canal em nível de margens plenas e **D** é profundidade média do canal. Canais estreitos e profundos apresentam valor de **F** reduzido; canais largos e rasos apresentam valores de **F** elevados. Levantamentos periódicos permitem conhecer a tendência de processo dominante na Área da Seção, para a qual basta calcular a diferença entre o **F(final)** e o **F(inicial)**. Onde: **ΔF** negativos indicam predominância de erosão e **ΔF** positivos o de deposição.

Variação do Residual da Área da seção ($\Delta A\%$): utilizado para quantificar a mudança na área da seção transversal:

$$\Delta A\% = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_{i\text{ant}} - Y_{i\text{post}})}{\sum_{i=1}^n Y_{i\text{ant}}} \times 100 \quad (4)$$

Onde, Y_i corresponde a profundidade do canal, n é o total de leituras de profundidade, Y_{ant} e Y_{post} são os levantamentos anteriores e posteriores para cada comparação. Os valores negativos ou positivos da $\Delta A\%$ indicam a predominância dos processos de erosão ou deposição respectivamente.

Variação do Total da Área da seção ($|A\%|$): representa a porcentagem total da área afetada pela erosão e a deposição.

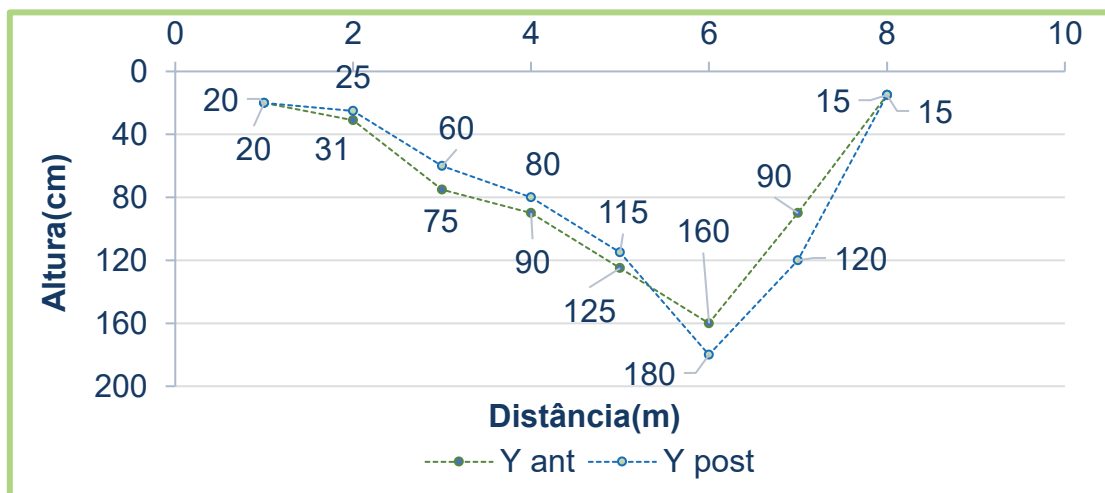
$$|\Delta A\%| = \frac{\sum_{i=1}^n |Y_{i\text{ant}} - Y_{i\text{post}}|}{\sum_{i=1}^n Y_{i\text{ant}}} \times 100 \quad (5)$$

Para elucidar esta proposição, Fernandez et al., (2001) tabulam (Quadro 5) dados de uma seção transversal hipotética, onde os perfis correspondem a dois levantamentos sucessivos, com seus respectivos valores de profundidades (Y), dadas em centímetros, bem como o resultado dos índices.

Quadro 5 Exemplo de obtenção dos índices em um perfil transversal hipotético.

	1 LEV	2 LEV		
	Y_{ant}	Y_{post}	$(Y_{\text{ant}} - Y_{\text{post}})$	$ (Y_{\text{ant}} - Y_{\text{post}}) $
1	20	20	0	0
2	31	25	6	6
3	75	60	15	15
4	90	80	10	10
5	125	115	10	10
6	160	180	-20	20
7	90	120	-30	30
8	15	15	0	0
Σ	606	615	-9	91
$\Delta A = -1,48\%$ e $ \Delta A = 15,02\%$				

Fonte: Fernandez et al. (2001)



4.2.4 Fotogrametria com VANT

Neste subcapítulo apresenta-se o fluxo de trabalho usado no monitoramento e a aquisição das imagens de alta resolução com o VANT. Para tanto, foram implementados os procedimentos realizados por Rusnák et al. (2017): reconhecimento por dados secundários do local a ser mapeado, verificação de campo pré-voo, planejamento e execução de voo, processamento dos dados aéreos e, por fim, o mapeamento das feições fluviais. A Figura 20 ilustra o percurso metodológico dos procedimentos realizados para aquisição das ortomosaicos que subsidiam o mapeamento.

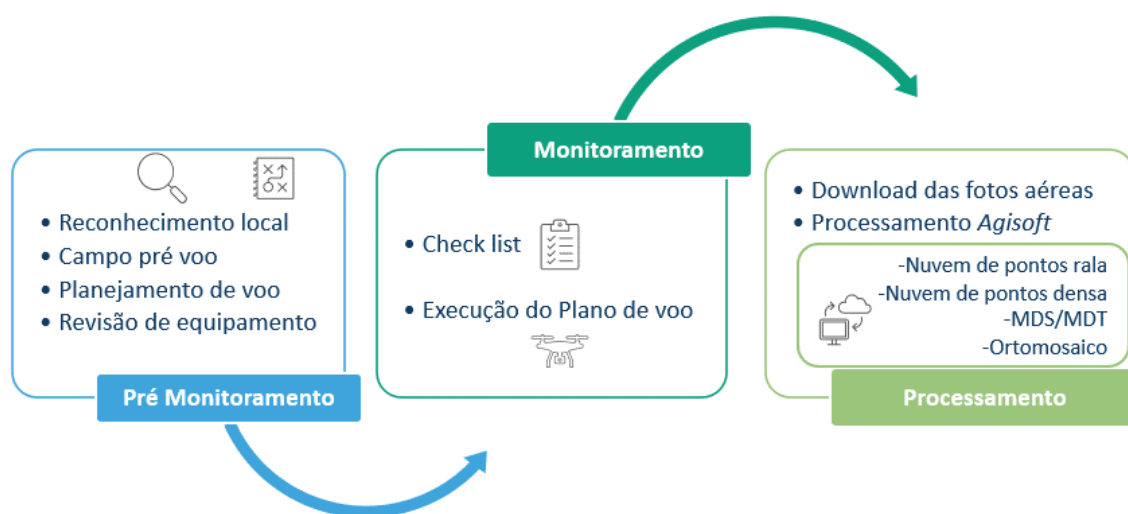


Figura 20 Etapas para aquisição de imagens de alta resolução com VANT

Importa esclarecer que o monitoramento é precedido de um *check list* dos materiais para campanha, que incluem o VANT, estação total e seus acessórios, equipamentos de proteção individual e ferramentas para limpeza e manutenção das seções transversais. Em campo é realizado o aerolevanteamento com VANT e levantamento topográfico das seções transversais permanentes com a ET; 2) Escritório: processamento e tabulação de dados da ET, modelagem das fotos do VANT, fotointerpretação e mapeamento das feições.

O aerolevanteamento foi realizado com o VANT modelo *Phantom 4 Advanced*, fabricado pela DJI. De acordo com o fabricante, este modelo tem autonomia de voo de até 30 minutos e resiste a ventos de até 10 m/s (36 km/h). Possui embarcado receptor GPS (*Global Position System*) e GLONASS (*Globalnaya Navigatsionnay a Sputnikovaya Sistema*). A câmera utilizada pelo *Phantom 4 Adv.* atua apenas nas bandas visíveis do espectro-eletromagnético (0,4 a 0,7 μm). Por se tratar de um sensor passivo, capta apenas objetos iluminados pela radiação solar. Possui resolução de 20 megapixels e sensor óptico de 1 polegada. Durante o voo, a câmera é estabilizada com o apoio em um *guimbal* de três eixos.

As configurações dos planos de voo foram definidas na plataforma *Drone Deploy*, aplicativo que pode ser instalado em tablet ou smartphone, posteriormente operado com o rádio controle do VANT. Foi definido um plano de voo de aproximadamente 1 hectare para cada área amostral, mantendo a localização da seção transversal no centro do plano de voo. Os parâmetros de voo e dos produtos fotogramétricos foram estabelecidos conforme descritos no Quadro 6, onde a quantidade de fotos e resolução espacial das imagens foi dada pelo próprio aplicativo. A resolução espacial do MDE foi obtida na fase de pós-processamento e modelagem das imagens. Ressalta-se que, devido à densa cobertura vegetal e interferências eletromagnéticas de torres de alta tensão, não foram realizados voos com VANT na seção 05.

Quadro 6 Parâmetros de voo e dos produtos fotogramétricos.

	Seção 01	Seção 02	Seção 03	Seção 04
Área de voo	0,9 hectare	1 hectare	0,8 hectare	0,8 hectare
Altura de Voo	60 m	60 m	60 m	60 m
Velocidade de voo	5 m/s	5 m/s	5 m/s	5 m/s
Sobreposição frontal	80%	80%	80%	80%
Sobreposição lateral	75%	75%	75%	75%
Quantidade de fotos	80	90	69	63
Resolução Espacial da imagem	1,78 cm	1,78 cm	1,78 cm	1,78 cm
Resolução Espacial do MDE	7,13 cm	7,13 cm	7,13 cm	7,13 cm

A fim de reduzir problemas com sombreamentos ocasionados pelo ângulo solar, optou-se por executar os voos entre 11h30m e 13h00m, quando os objetos do solo estão próximos do nadir em relação ao sol. Para aprimorar a captação de pontos que representam o terreno, o recurso de melhoramento 3D no aplicativo foi ativado. Este recurso faz com que o aparelho execute o voo em direções cruzadas com a câmera em 90° e perimetral com câmera oblíqua apontada para o centro da área do sobrevoo, conforme o croqui da direção de planos de voo (Figura 21). Contudo, vale destacar que tal configuração eleva significativamente a quantidade de imagens registradas para uma mesma área, bem como o esforço computacional do processamento.

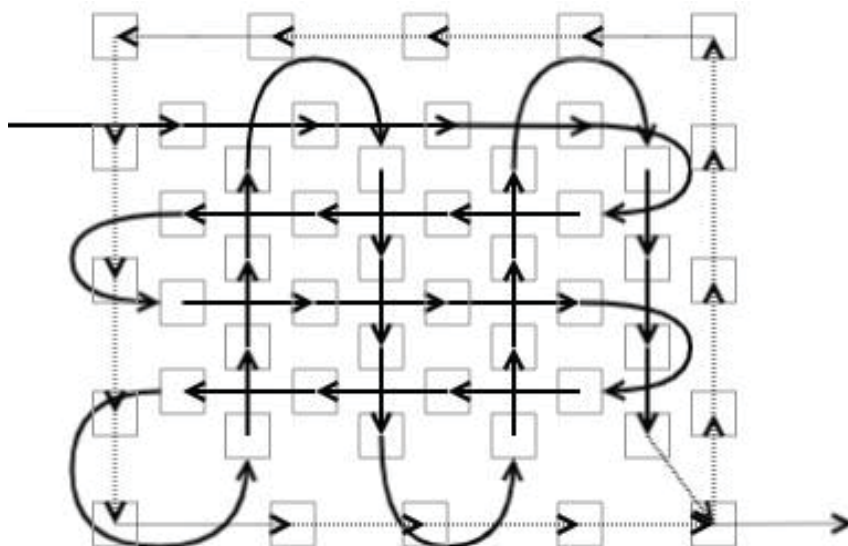


Figura 21 Croqui da direção de plano de voo.
Fonte: o autor (2020)

Para o processamento das imagens do VANT foi utilizado o software *Agisoft Metashape Professional* versão 16.4 que permite a geração de modelo tridimensional (MDS e MDT), ortomosaico e nuvem de pontos (Figura 22). Para a confecção destes produtos foram adotados parâmetros de alta resolução e alta qualidade de processamento. O algoritmo interpolador das imagens para geração dos produtos digitais corresponde a estrutura TIN (*Triangulated Irregular Network*) (OLIVEIRA et al., 2017). Os processamentos foram realizados com a utilização de um computador com as seguintes especificações: processador *Intel Core i5-8600K* 3.60GHz e 9 Mb de *cache*, refrigeração a água, placa gráfica *GeForce GTX 1060* com 6 Gb; e 24 Gb de memória *RAM (Random Access Memory)* instalada.



Figura 22 Modelagem tridimensional produzida a partir das imagens do VANT.
Fonte: o autor (2020)

Neste ponto, é importante esclarecer que a confecção das nuvens de pontos, MDS e do ortomosaico. *Tie Point* e *Dense Cloud* são gerados a partir da colinearidade de pontos das fotografias aéreas do VANT. Primeiramente é gerada a nuvem de pontos rala (*Tie Point*) para

alinhamento das fotos, em seguida a nuvem de pontos densa (*Dense Cloud*) que permite a geração do MDS, bem como o MDT em situações com pouca vegetação, e, por fim, o ortomosaico.

Por oportuno e para obtenção de registros históricos, ao longo dos meses de monitoramento foram realizados voos complementares sobre rio Jacaré. Para estes voos foi definida uma faixa de recobrimento com aproximadamente 200 metros de largura, por 3,5 quilômetros de comprimento. Com base nisso, e tendo em vista a autonomia e recomendações de segurança de voo com VANT citadas pelo fabricante e pela agência reguladora de aviação aérea (ANAC, 2017 e DECEA, 2019), foram estabelecidos parâmetros para o planejamento de voo que atendessem tais recomendações. Assim, a área foi dividida em três planos de voo e posteriormente, no software *Agisoft Metashape*, as fotografias foram agrupadas e processadas em conjunto, produzindo um ortomosaico contínuo do leito do rio. Os parâmetros aplicados ao plano de voo e produtos fotogramétricos são descritos no Quadro 7.

Quadro 7 Parâmetros de voo longitudinal

	Plano de Voo 01	Plano de Voo 02	Plano de Voo 03
Área de voo	29 hectares	22 hectares	11 hectares
Altura de Voo	120 m	120 m	120 m
Velocidade de voo	15 m/s	12 m/s	12 m/s
Sobreposição frontal	75%	75%	75%
Sobreposição lateral	65%	65%	65%
Quantidade de fotos	279	237	125
Resolução Espacial da imagem	3,4 cm	3,4 cm	3,4 cm
Resolução Espacial do MDE	15 cm	15 cm	15 cm

A área de abrangência dos voos fotogramétricos sobre as seções transversais (áreas amostrais) e o voo longitudinal (leito na planície), bem como os locais de decolagem e pouso está representada na Figura 23.

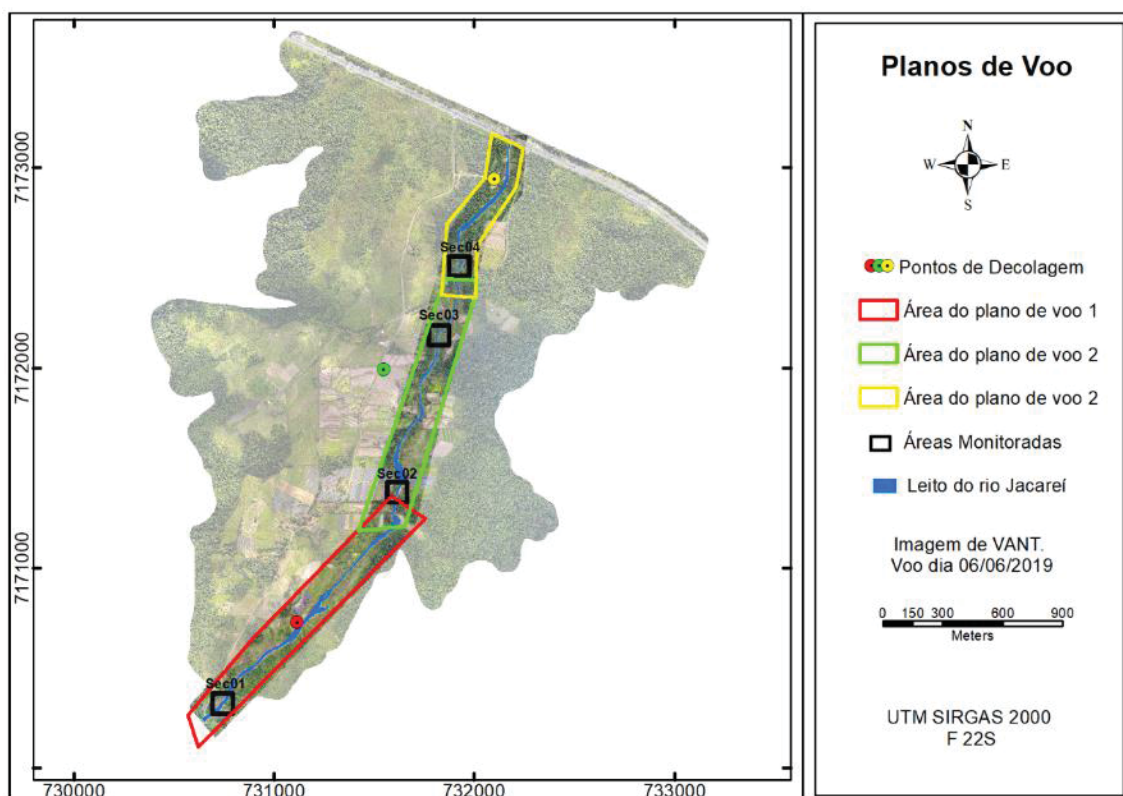


Figura 23 Distribuição dos planos de voo sobre a planície da bacia do rio Jacaré.

Para a representação espacial dos produtos fotogramétricos, bem como o mapeamento geomorfológico, foram confeccionados layouts em formato A2 (594x420 mm). Tal dimensão foi utilizada com o objetivo de apresentar a elevada resolução espacial, bem como manter-se próxima da escala dos produtos digitais (*raster e shapefiles*).

4.2.5 Precipitação

Com o intuito de analisar a relação entre processos geomorfológicos ocorridos no rio e a precipitação registrada no período monitorado (outubro de 2019 a janeiro de 2021), foram utilizados dados de precipitação diária da estação A873, do INMET, localizada em Morretes (Figura 24), que possui dados disponíveis desde 2019 até o tempo presente. A exemplo do estudo de caso desenvolvido por Binda e Fernandez (2011) e Marçal (2013), os volumes de precipitação diária foram somados à cada intervalo de monitoramento (campanhas), com isso, mensurando a precipitação acumulada (mm), também foram contabilizados os dias de chuva. Por fim mensurada a relação matemática entre a precipitação acumulada e o intervalo de dias entre uma campanha e outra.

Para caracterização das médias históricas de precipitação, foram utilizados dados mensais de precipitação e dias de chuva entre os anos de 1986 a 2015 da Estação 2548049 (ANA), localizada na Colônia Santa Cruz, bacia hidrográfica adjacente à bacia do rio Jacaré. Os dados foram apresentados em diferentes gráficos de distribuição mensal, de modo a caracterizar a média histórica e as variabilidades anuais presentes na série. A representação do histórico do

volume de chuvas, permite também contextualizar o momento climático que a presente pesquisa se localiza.

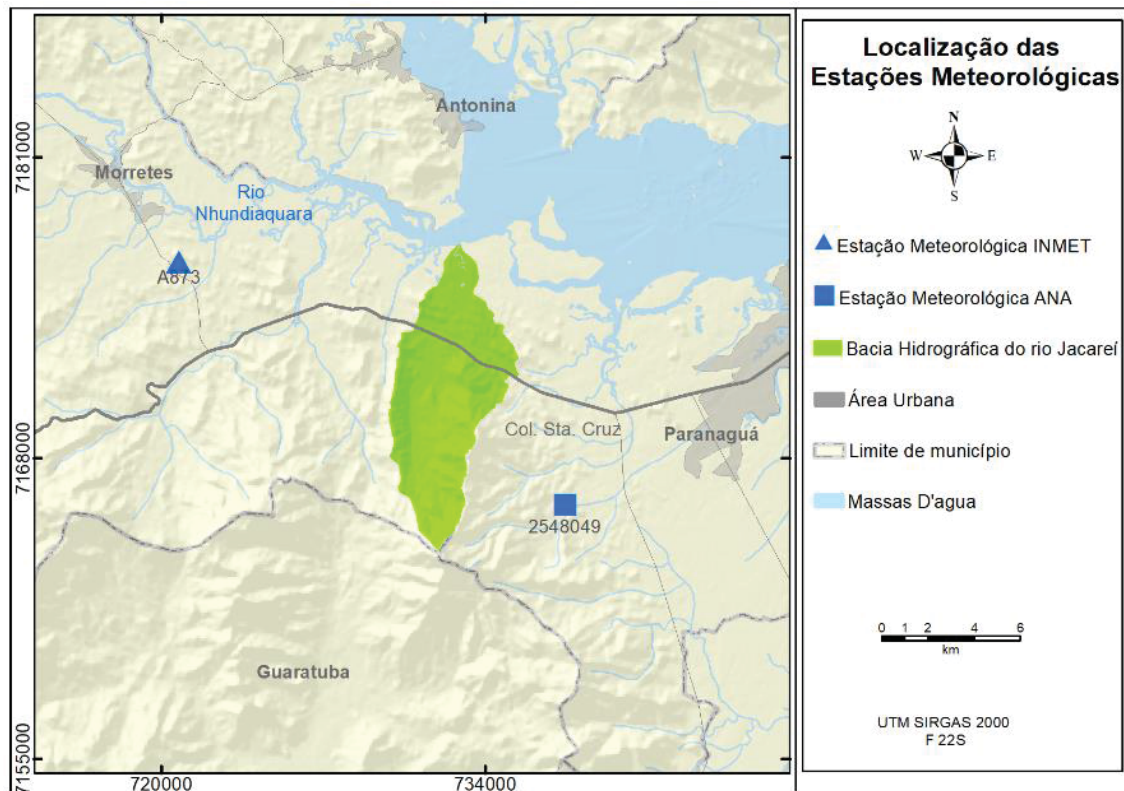


Figura 24 Localização das Estações Meteorológicas
Fonte: o autor (2021)

5. RESULTADOS

Os resultados da presente pesquisa referem-se aos produtos da obtenção, processamento e análise de dados topográficos e fotogramétricos, em conjunção aos dados de precipitação, bem como à elaboração de chave classificatória de paisagens fluviais. Dos dados obtidos nas 6 campanhas de monitoramento resultaram 19 perfis topográficos, 21 ortomosaicos e 21 mapas geomorfológicos. Da análise destes dados obtiveram-se conclusões que corroboram à compreensão dos processos geomorfológicos em uma bacia hidrográfica de rápida resposta hidrológica, bem como apresentaram-se contribuições às discussões sobre mapeamento geomorfológico de detalhe com a utilização de VANT.

5.1 Proposições para mapeamento geomorfológico fluvial de detalhe

A proposição de mapeamento geomorfológico de feições fluviais de grande escala, desenvolvido neste trabalho, compreende um método aplicável a rios que apresentam feições fluviais não ocultadas por vegetação ou cobertas pela água. A seguir discorre-se sobre a chave de classificação que representa a estrutura e termos de designação das feições, bem como a demonstração prática da aplicação da proposta na planície da bacia hidrográfica do rio Jacaré.

5.1.1 Chave de classificação

Com base nas proposições discutidas por Silva e Santos (2015), Riccomini et al. (2009) e no detalhamento do sexto nível categórico da classificação taxonômica de Ross (1992), elaborou-se uma chave classificatória para paisagens fluviais (Figura 25), no âmbito da qual é designado, primeiramente, o nível referente ao processo dominante à feição, com 3 classes. Em seguida, a forma da feição, com 14 subclasses, e, na sequência, 12 fatores de controle da feição, divididos em estrutura e substrato.

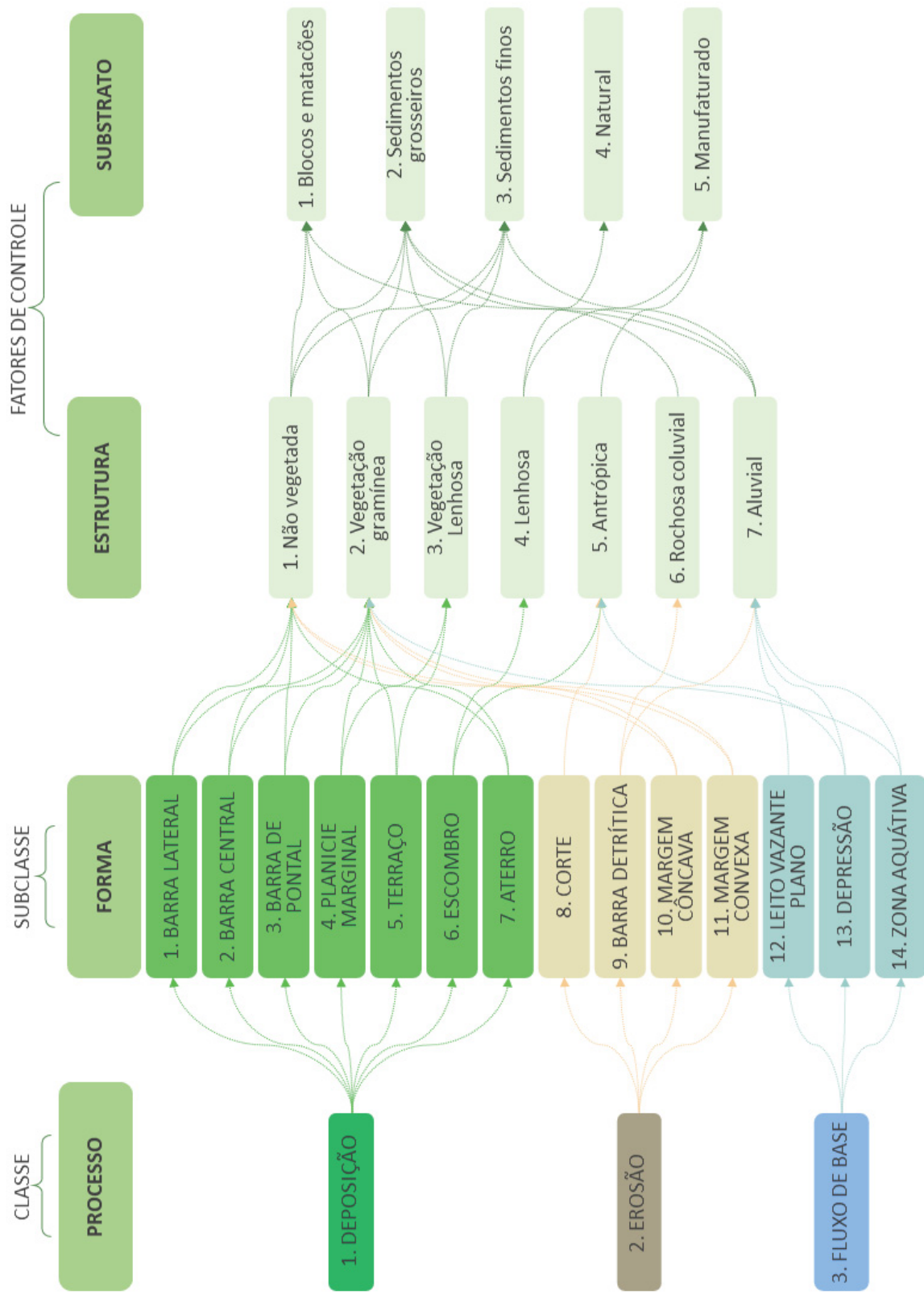


Figura 25 Estrutura básica da chave classificatória para paisagens fluviais.

O primeiro critério (Classe) de mapeamento diz respeito a morfogênese da feição, aqui denominado de Processo, definido a partir dos fatores atuantes predominantes sobre um local (GUERRA, 1993). Neste caso, consideraram-se os processos de deposição e erosão como os principais agentes de formação de feições (OLSON-RUTZ e MARLOW, 1992; FERNANDEZ et al., 2001; CUNHA, 2012). Vale destacar que os fatores predominantes correspondem à intensidade da ação do próprio rio, às características físicas da estrutura da feição, ao substrato e à ação antrópica (STEVAUX e LATRUBESSE, 2017).

Frente a dificuldade de identificar e mapear os processos e formas submersas, foi criada a classe “Fluxo de Base”, compreendendo todas as áreas com afloramento d’água, isto é, o leito vazante ou áreas húmidas. Estas, por sua vez, podem ser resultado da ação antrópica ou natural.

O segundo critério (Subclasse) para o mapeamento compreende as dimensões tridimensionais da microfeição, aqui denominado de Forma. Este critério pode retratar objetos naturais ou antrópicos ou porções da superfície que se diferenciam entre si. A exemplo, Stevaux e Latrubesse (2017) explicam que os nomes das feições dizem respeito à sua própria localização ou origem.

Os ‘Fatores de Controle’ apresentam correlação com a cobertura do solo e correspondem aos elementos capazes exprimir a capacidade de controle e estabilidade da feição frente à ação fluvial. As duas subclasses que compõem este nível assemelham-se pela função classificadora, mas diferem pela caracterização. A Estrutura compreende termos que representam características que vão oferecer maior ou menor estabilidade à feição. O “Substrato”, por sua vez, compreende a composição material da ‘subclasse’ e expressa também o nível de resistência ao movimento frente a ação fluvial. Este nível demanda verificação em campo para validação da atribuição. Em situações, onde não é possível o enquadramento de acordo com a capacidade de oferecer estabilidade à feição ou permanecer estável frente à ação fluvial, designam-se termos como antrópico, manufaturado ou natural.

Os significados dos termos empregados na classificação das feições são apresentados no Quadro 8.

Quadro 8 Termos classificatórios para as feições fluviais

Classe – PROCESSO: morfogênese	
1 DEPOSIÇÃO	Corresponde ao material sólido carregado pelas águas dos rios e acumulado no canal, formando as feições deposicionais.
2 EROSIÃO	Corresponde à perda de material, geralmente associada à ação mecânica exercida pela água na destruição das saliências ou reentrâncias do relevo. Associa-se também, este termo, a ação antrópica de corte ou aplainamento das margens e do leito do rio.
3 FLUXO DE BASE	Compreende os locais de afloramento do nível freático ou acúmulo superficial de água. Locais cobertos pela água, onde não é possível denotar ou identificar pela imagem o processo dominante atual.
Subclasse – FORMA: dimensões tridimensionais	
1 BARRA LATERAL	Deposição com formato longitudinal que ocorrem junto às margens dos canais fluviais
2 BARRA CENTRAL	Deposição com formato longitudinal, não conectadas a margem e circundada por água de todos os lados
3 BARRA DE PONTAL	Comporta os sedimentos removidos nas margens côncavas e depositados nas margens convexas dos meandros seguintes
4 PLANÍCIE MARGINAL	Área adjacente ao nível de margens plenas
5 TERRAÇO	Superfície horizontal ou levemente inclinada, constituída por depósito sedimentar, ou superfície topográfica modelada pela erosão fluvial (GUERRA, 2008)
6 ESCOMBRO	Materiais diversos caídos ou lançados na calha do rio. Como troncos de árvores ou objetos de origem antrópica (BINDA e FERNANDEZ, 2011).
7 ATERRO	Depósito artificial de materiais diversos associado a ação proposital de estabilização de processo erosivo.
8 CORTE	Incisão horizontal ou vertical com remoção de volumes de solo ou sedimentos.
9 BARRA DETRÍTICA	Sedimentos residuais localizados nas margens do rio. Material depositado durante eventos pluviométricos extremos com posterior seleção de sedimentos menores pela erosão decorrente eventos menos intensos (HASS, et al., 2020).
10 MARGEM CÔNCAVA	Plano de inclinação da margem do rio negativa. Associado a processo erosivo e evolução de meandros dos rios (JUNIOR e BARROS, 2020).
11 MARGEM CONVEXA	Plano de inclinação da margem do rio é positiva. Associado a processos deposicionais em meandros ou estáveis em trechos retilíneos. Pode apresentar processos erosivos mediante o aumento das vazões (JUNIOR e BARROS, 2020).
12 LEITO VAZANTE PLANO	Área coberta pela água em escoamento
13 DEPRESSÃO	Perda ou remoção de material em relação ao plano horizontal. Ocorre verticalmente em relação à superfície do leito vazante. Associada à formação de sulcos, cavidades ou escavações cobertas pela água.
14 ZONA AQUÁTICA	Zonas aquáticas de várzea são associadas às porções de água na da planície alagada e incluem dois tipos de feição (lagos de várzea e zonas úmidas) (BELLETTI et al., 2017)
Fator de Controle – ESTRUTURA: características associadas a estabilidade	
1 Não Vegetada	Sedimento ou solo exposto sem a presença de vegetação. Confere a menor contribuição para controle da estabilidade da feição.
2 Vegetada gramínea	Predomínio de espécies pioneiras em estágio inicial de desenvolvimento, principalmente formada por capins e gramíneas. Devido a zona de raízes ser pouco profunda, oferece contribuição intermediária para o controle e estabilidade da feição.
3 Vegetada lenhosa	Composta por vegetação arbóreo-arbustiva. A zona de raízes profunda confere a feições cobertas por esta vegetação, maior estabilidade frente a processos erosivos.
4 Lenhosa	Objetos oriundos de escombros lenhosos como troncos de árvores, galhos e raízes. Dispostos no leito, causam turbulência na água, podendo criar feições, erosivas ou deposicionais (BINDA e FERNANDEZ, 2011; BELLETTI et al., 2017).
5 Antrópica	Forma, estrutura ou substrato indefinido e de origem antrópica. Podendo ser associado a aterro ou estrutura para uso antrópico.
6 Rochosa coluvial	Pavimento formado por material detrítico, rochas ou colúvio. Material depositado do sopé de grandes vertentes pela ação da gravidade e eventos pluviométricos com aumento da energia dos fluxos (GUERRA, 1993).
7 Aluvial	Pavimento aluvial composto por areias e cascalho. Se dá pela prevalência periódica de fluxos com menor energia.
Fator de Controle – SUBSTRATO: composição do material	
1 Blocos e matacões	De acordo com a escala granulométrica (IBGE, 2007) correspondem a sedimentos com diâmetro superior a 200 mm.
2 Sedimentos grosseiros	Compostos por cascalhos e areia muito grossa com fração granulométrica de 2 mm a 20 mm (IBGE, 2007). Nesta classe, é importante a validação de amostras em campo.
3 Sedimentos finos	Compreendem os sedimentos com diâmetros menores que 2 mm, correspondendo as areias média e fina, silte e argila (IBGE, 2007). Nesta classe, é importante a validação de amostras em campo.
4 Natural	Que é natural da dinâmica geomorfológica e não associados a blocos, matacões, sedimentos finos e grosseiros Pode ser aplicado à objetos de madeira ou rochas isoladas.
5 Manufaturado	Restos de construção, resíduos domésticos ou quaisquer objetos criados ou transformados pela ação humana.

A análise prévia das imagens do VANT permitiu a detecção de diversas feições fluviais, as quais podem ser classificadas de acordo com termos classificatórios para as feições fluviais. São apresentados na Figura 26 exemplos de feições que podem ser classificadas de acordo com a chave proposta.

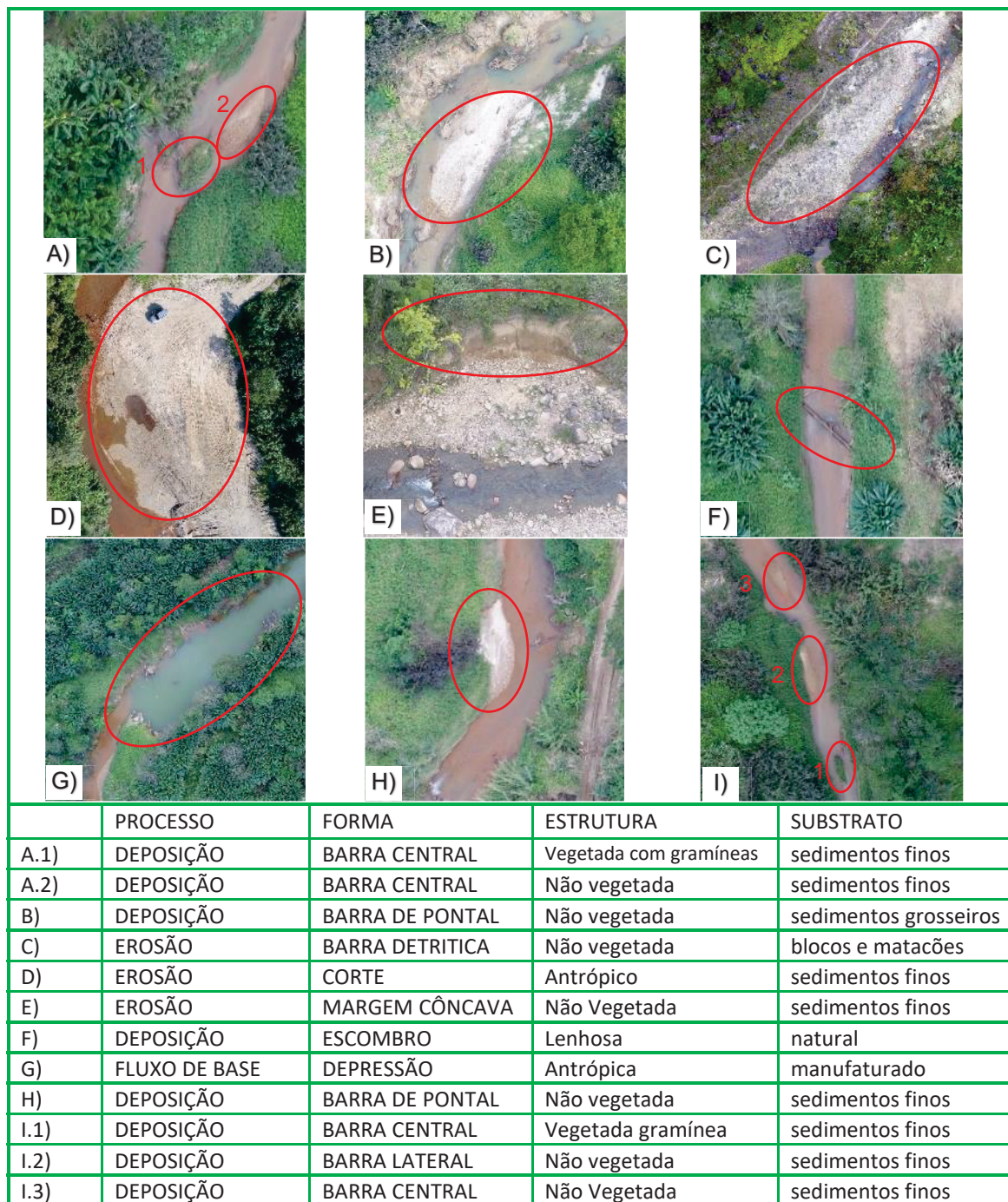


Figura 26 Amostras de feições identificadas por VANT.

5.1.2 Mapeamento das feições fluviais

Com sobrevoos semiautomatizados, foram obtidas em média 70 fotografias aéreas, em nadir e oblíquas em cada voo. Após processamento no software *Agisoft Metashape Professional*, foram obtidos os seguintes produtos fotogramétricos: nuvens de pontos rala e densa, MDS colorido (Figura 27) e ortomosaico (Figura 28). Destaca-se que, após o processamento, foi possível verificar que a captação de imagens oblíquas em áreas planas, pode incorrer em distorções da nuvem de pontos, uma vez que parte da imagem pode corresponder ao horizonte e o ponto tender ao infinito.

Este trabalho apresenta um modelo para mapeamento em alta resolução de paisagens fluviais com a tecnologia baseada em VANT. Seguindo o exemplo apresentado por Rusnák et al. (2017), foram realizados: reconhecimento do local mapeado; trabalho de campo pré-voo; planejamento e execução do voo; verificação e processamento de dados aéreos e, por fim, o mapeamento das feições fluviais.

A proposta de classificação e mapeamento geomorfológico é uma iniciativa que permite compreender analisar o potencial da utilização de imagens de VANT para a geomorfologia fluvial. Diversos trabalhos têm resultados favoráveis a essa discussão, como Rusnak et al. (2017); Gao et al. (2017), BELLETTI et al. (2017) e ABER et al. (2019). Entretanto, no que tange ao mapeamento, a carência de métodos e recursos que permitissem a distinção e classificação em alta resolução espacial das feições geomorfológicas em paisagens fluviais fomentaram o desenvolvimento desta pesquisa.

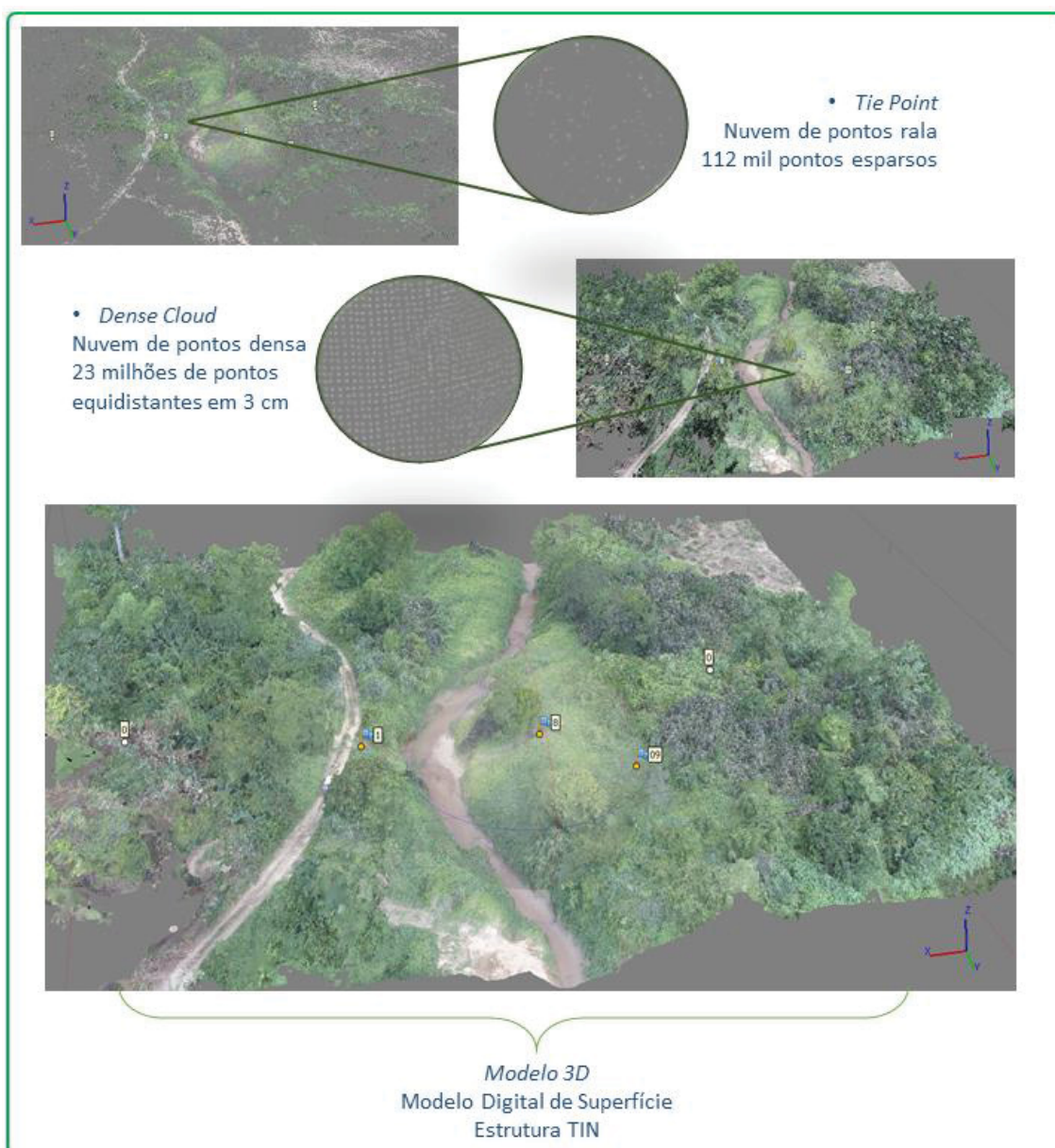


Figura 27 Produtos fotogramétricos do VANT

Devido à adoção de parâmetros de alta resolução e alta qualidade de processamento, foi demandado demasiado tempo de execução e esforço computacional. Foi possível a obtenção de produtos com resolução espacial de 1,75 cm, alta precisão e poucas distorções (Figura 28).

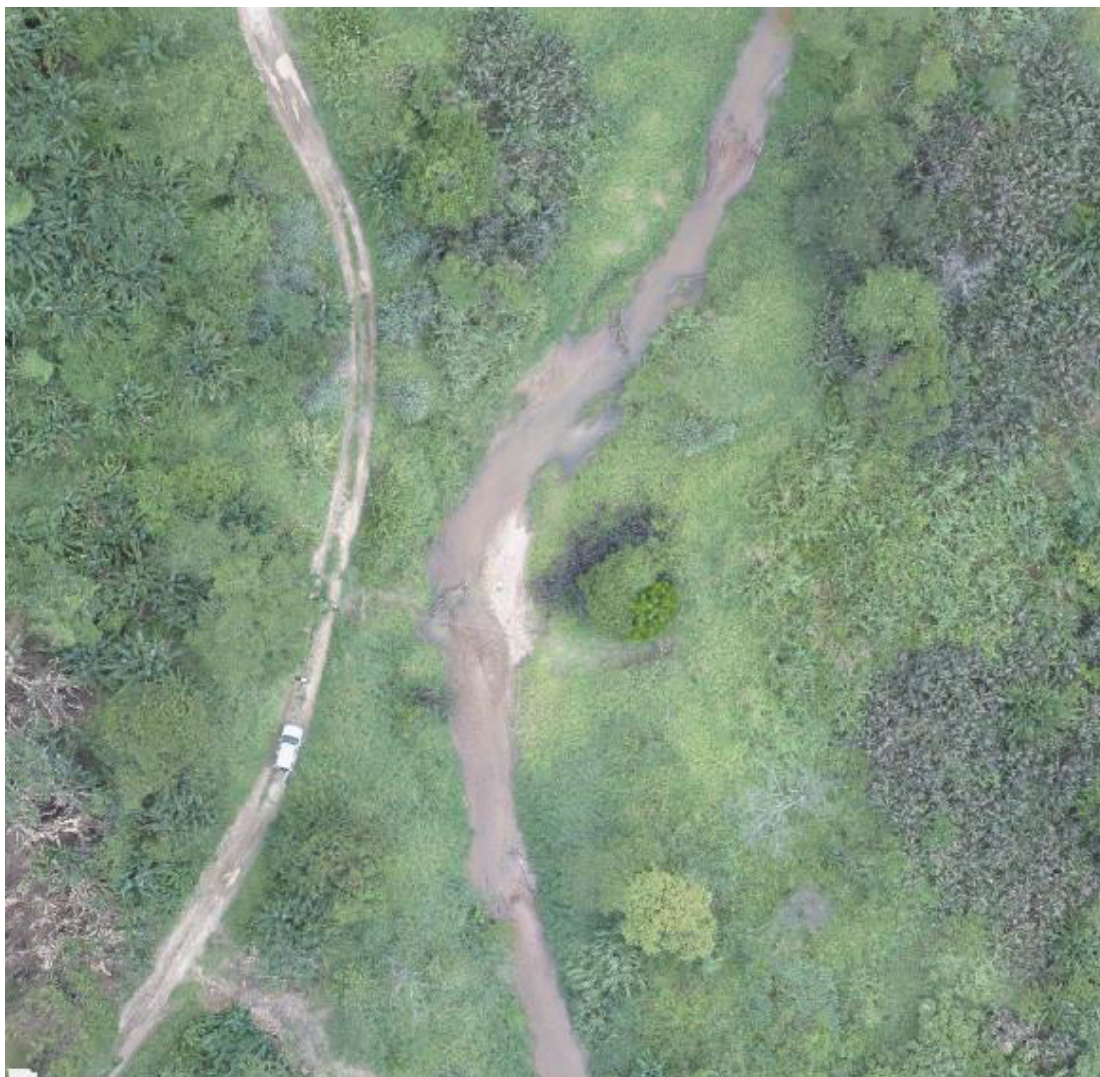


Figura 28 Ortomosaico produzido com as imagens do VANT para o mapeamento geomorfológico e aplicação da chave classificatória de paisagens fluviais

Neste ponto, é importante retomar um esclarecimento sobre o aspecto metodológico da confecção das nuvens de pontos, MDS e do ortomosaico. *Tie Point* e *Dense Cloud* são gerados a partir da colinearidade de pontos das fotografias aéreas do VANT. Primeiramente é gerada a nuvem de pontos rala (*Tie Point*) para alinhamento das fotos, em seguida a nuvem de pontos densa (*Dense Cloud*) que permite a geração do MDS, bem como o MDT em situações com pouca vegetação, e, por fim, o ortomosaico.

Apesar de reconhecer que a utilização de MDS e MDT é um recurso fundamental análise morfométricas, no âmbito deste trabalho ela se mostrou limitada, visto que a presença de vegetação densa, como já mencionado por Rusnak et al. (2017) e Belletti et al. (2017), impossibilitam a identificação de pontos na topografia, restringindo-se a pontos na vegetação. Tal questão pode, no entanto, ser explorada com a utilização de câmeras multiespectrais ou *Lidar*.

Esclarece-se, no entanto, que nesta etapa de processamento, foram diagnosticados problemas relacionados ao georreferenciamento das imagens, insuficiência na quantidade de pontos de controle e defeito técnico no VANT. A ocorrência simultânea de tais problemas identificados, resultaram em erros no processamento e produtos com divergências nas posições horizontal e vertical e impossibilitaram a correta projeção e sobreposição dos MDS.

Com base na altíssima resolução espacial dos ortomosaicos (7 cm), associados ao detalhamento previsto na chave classificatória (Subcapítulo 5.1.1), foi possível representar na base cartográfica 52 feições na escala 1:80, com formato *shapefile*. Entretanto, em face das limitações para representar graficamente os mapas junto ao presente documento, optou-se por reduzir a escala dos mapas à 1:250.

As Figuras 29 a 40, correspondem aos mapas produzidos a partir dos sucessivos levantamentos do VANT sobre a área de 1 hectare no entorno das quatro seções transversais monitoradas para o objetivo 2 da presente pesquisa. Das 52 feições identificadas, 30 correspondem formas de deposição, 15 são formas erosivas e 7 compreendem a classe denominada fluxo de base (por não se enquadrar em deposição ou erosão).

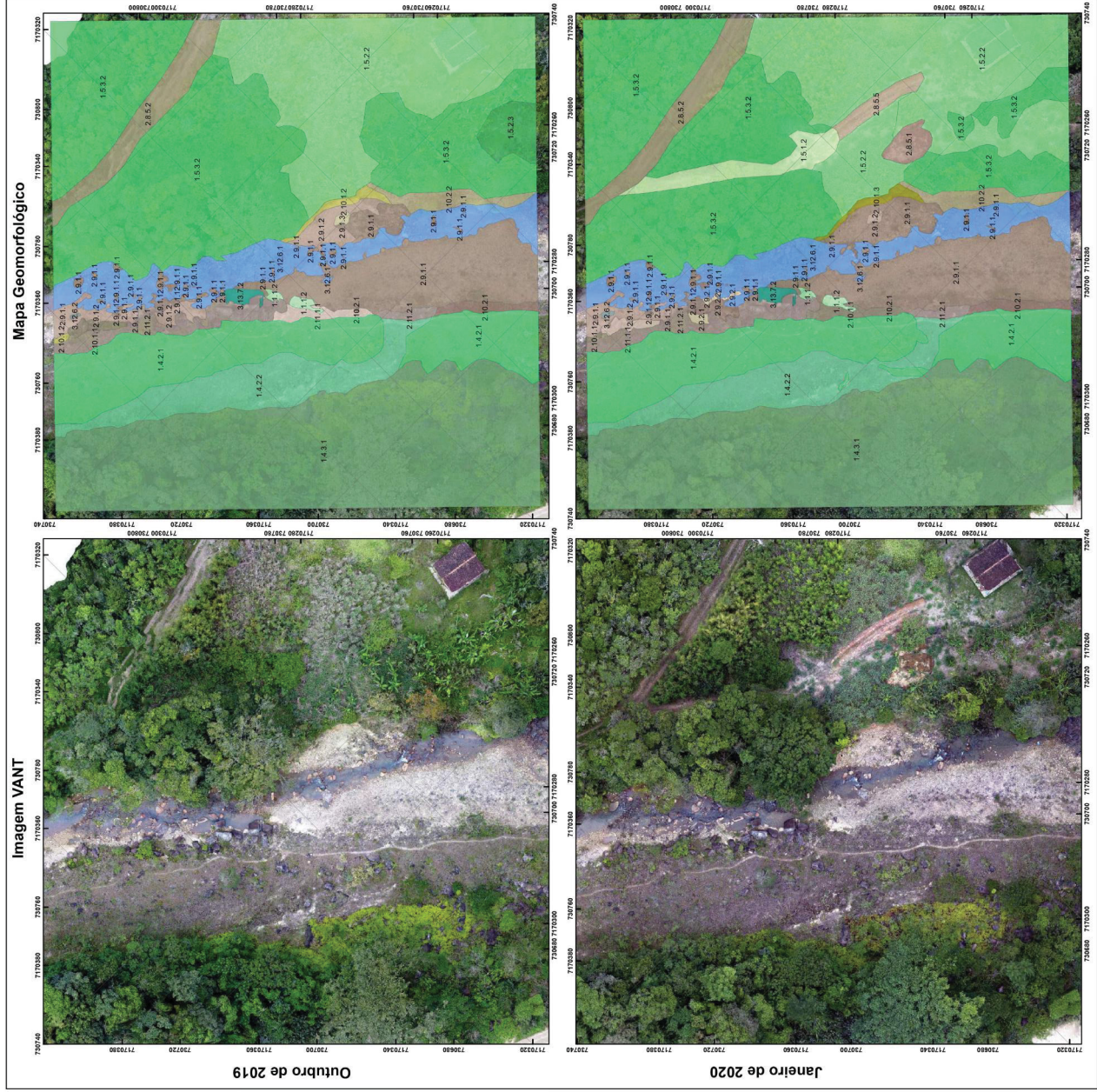


Figura 29 Mapeamento Geomorfológico de detalhe da seção 01 nos meses de outubro de 2019 e janeiro de 2020

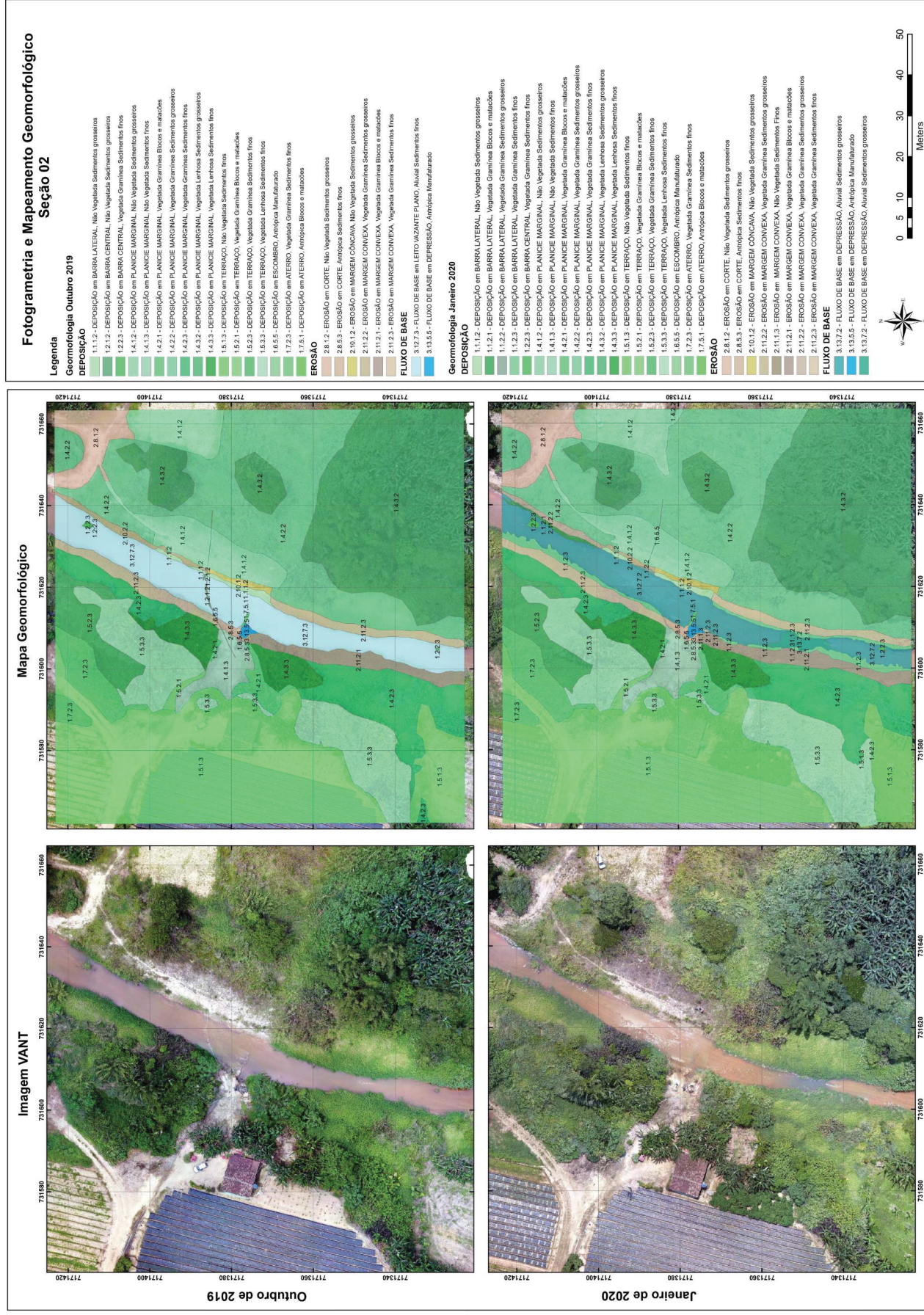


Figura 32 Mapeamento Geomorfológico de detalhe da seção 02 nos meses de outubro de 2019 e janeiro de 2020

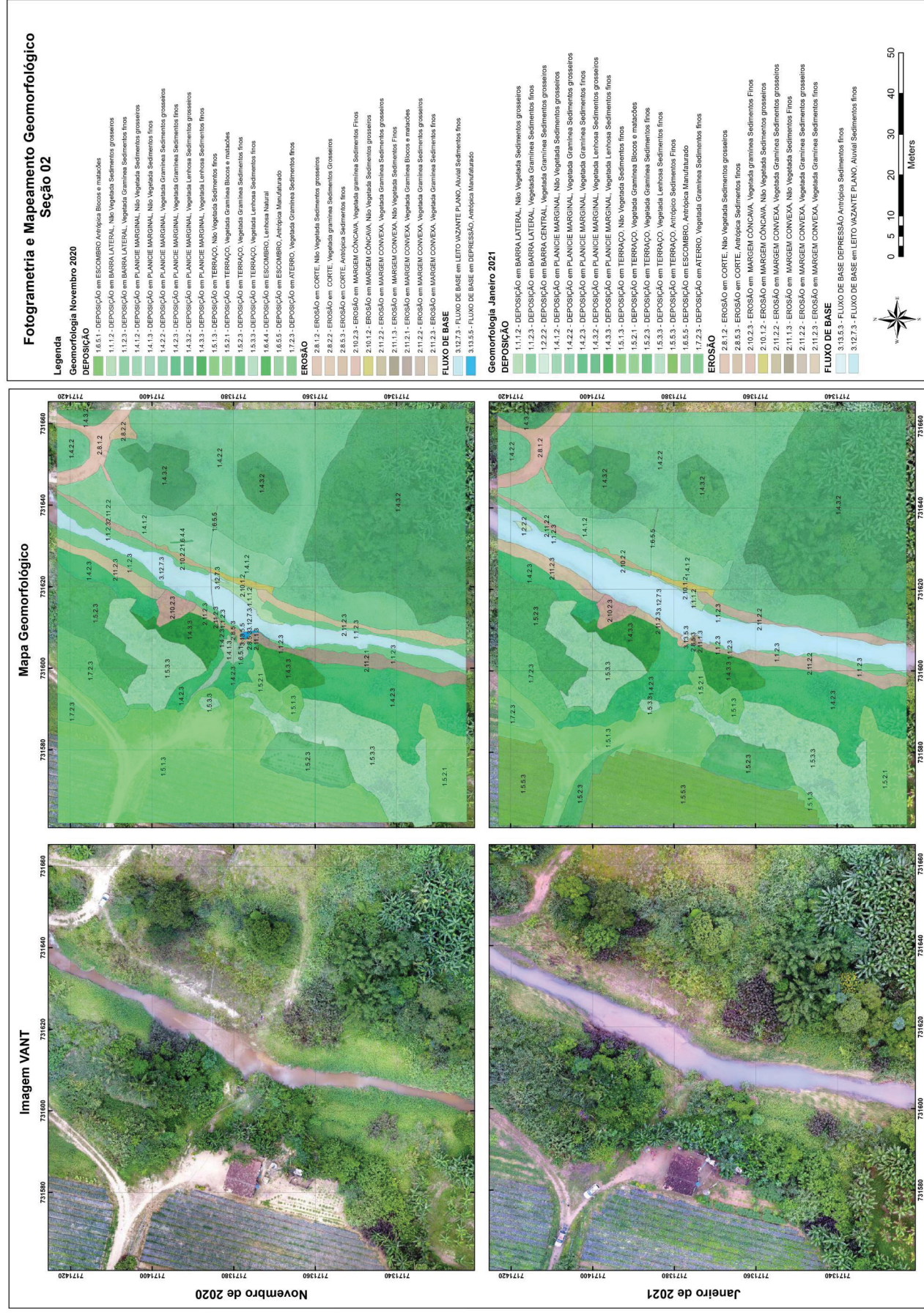


Figura 34 Mapeamento Geomorfológico de detalhe da seção 02 nos meses de novembro de 2020 e janeiro de 2021

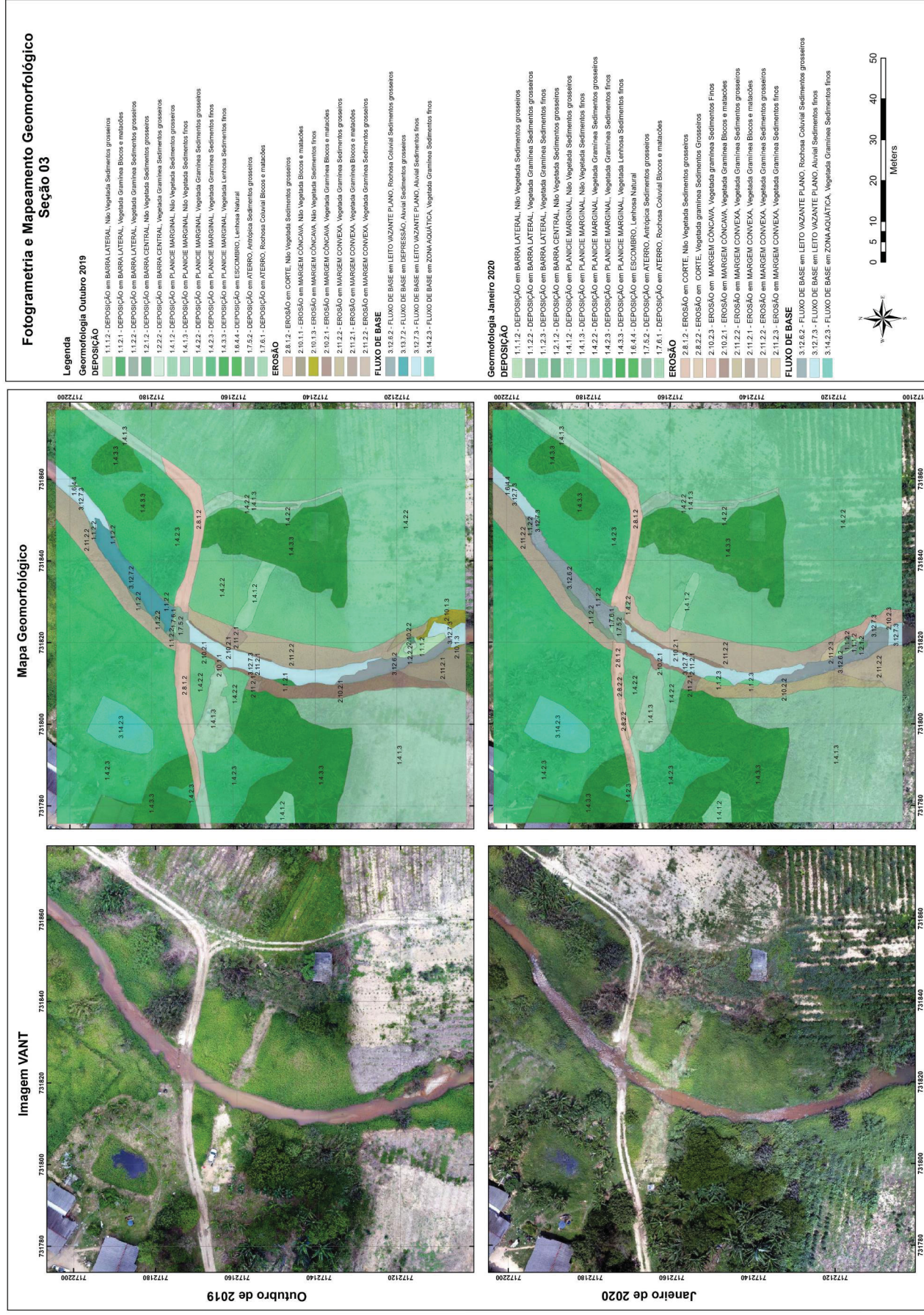


Figura 35 Mapeamento Geomorfológico de detalhe da seção 03 nos meses de outubro de 2019 a janeiro de 2020

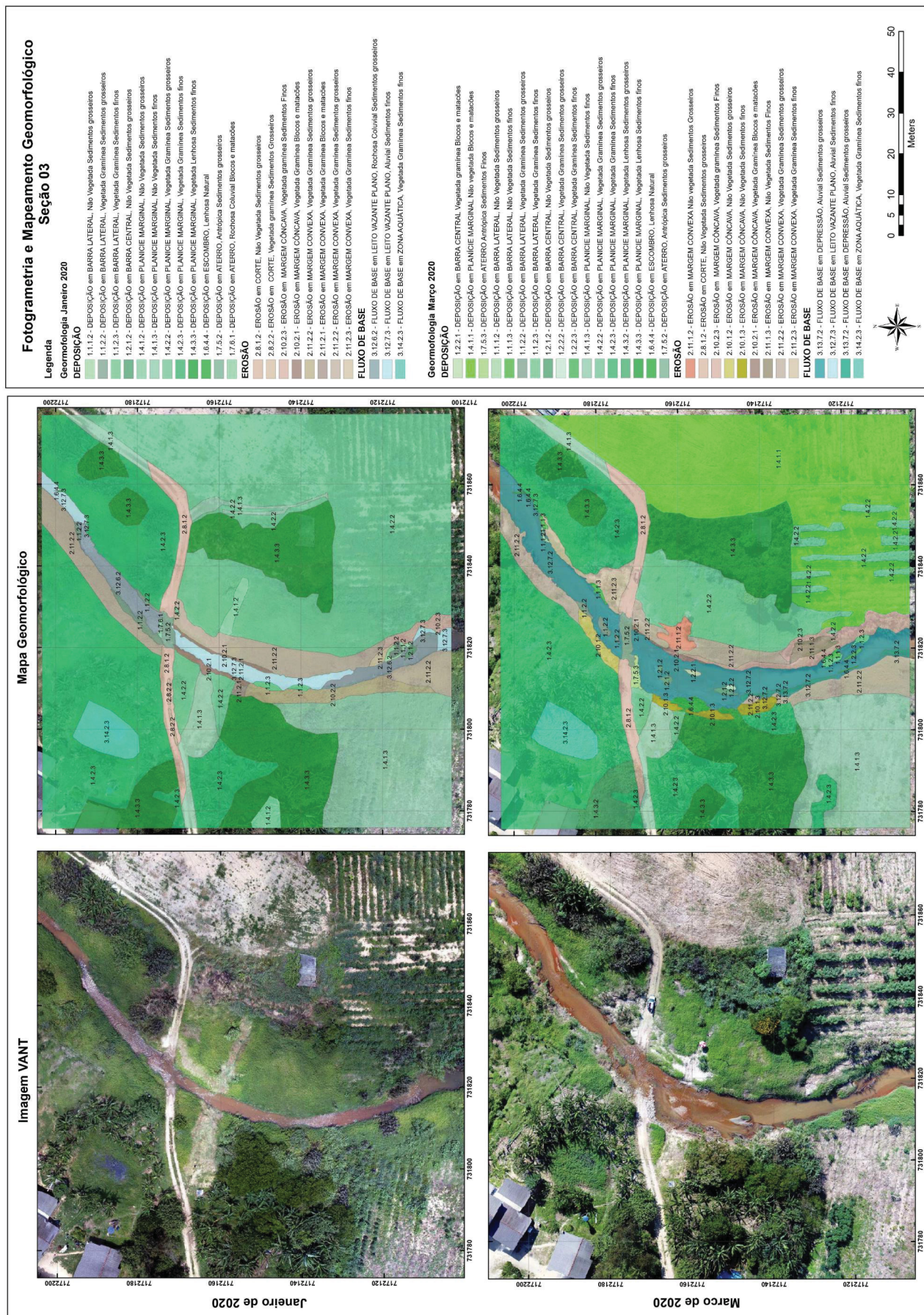


Figura 36 Mapeamento Geomorfológico de detalhe da seção 03 nos meses de janeiro e março de 2020

Figura 37 Mapeamento Geomorfológico de detalhe da seção 03 nos meses de março de 2020 e janeiro de 2021

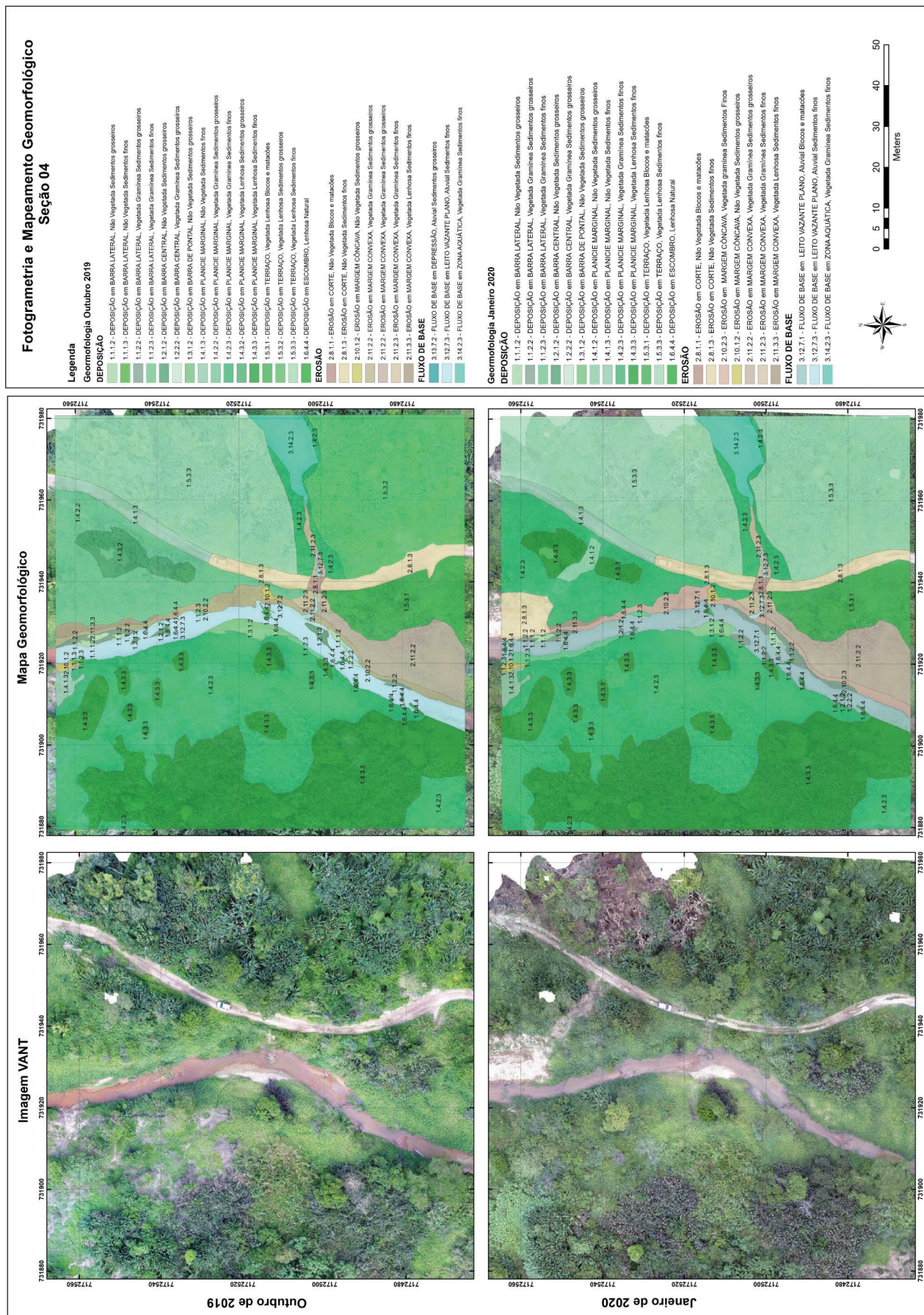


Figura 38 Mapeamento Geomorfológico de detalhe da seção 04 nos meses de outubro de 2019 e janeiro de 2020

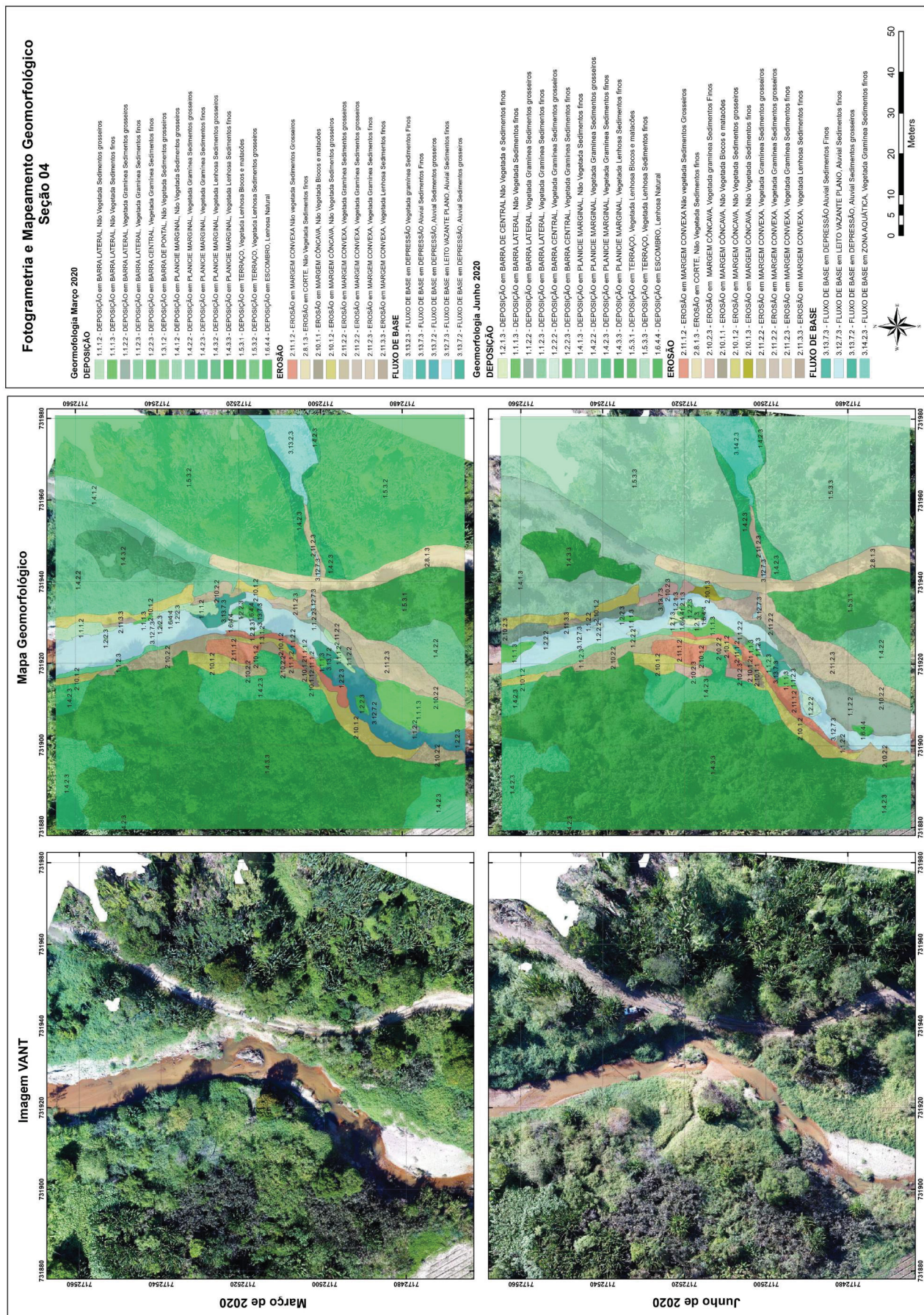
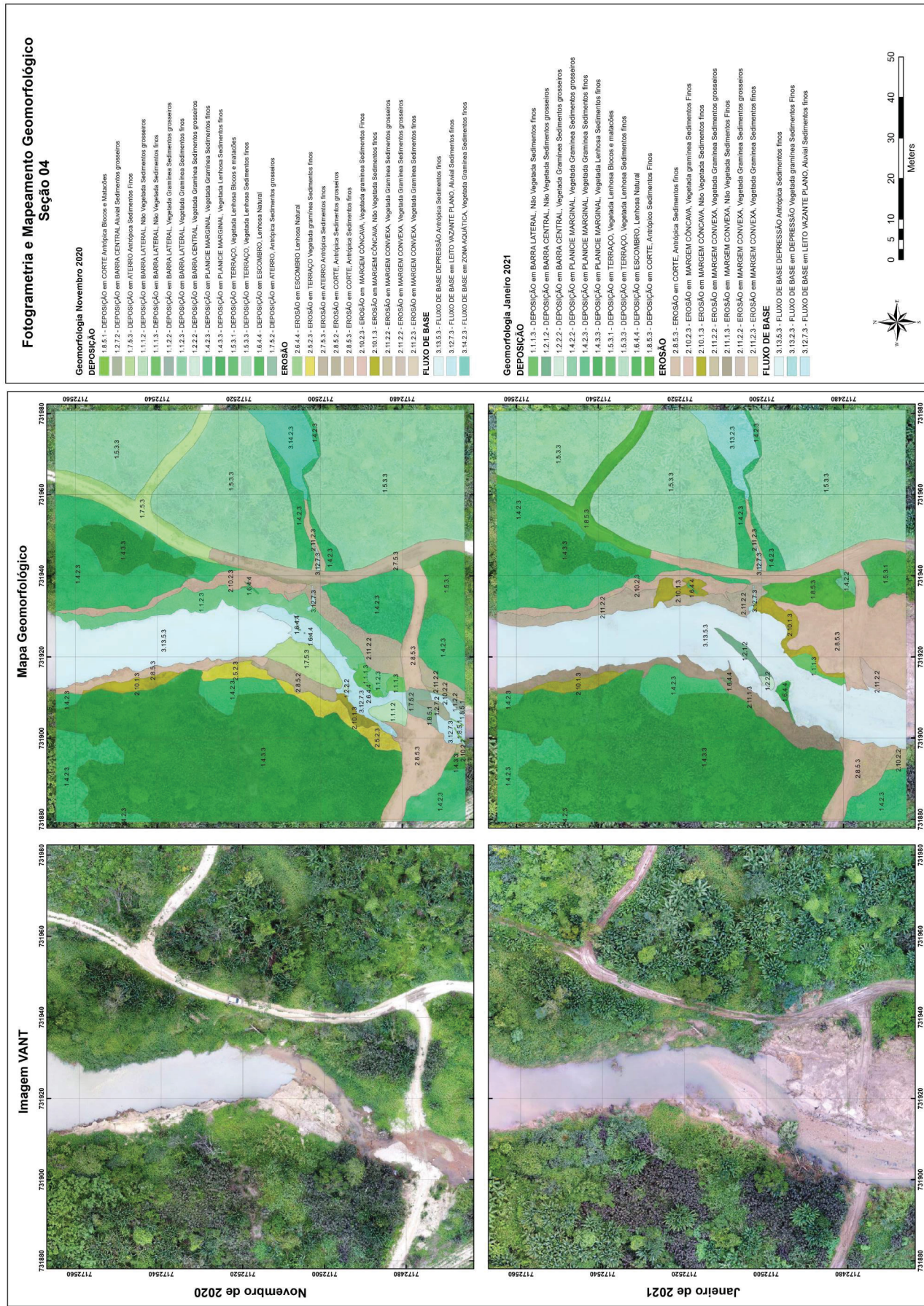


Figura 39 Mapeamento Geomorfológico de detalhe da seção 04 nos meses de março e junho de 2020



De acordo com Wolman e Miller (1960), Chistofolletti (1981) e Belletti et al. (2017), processos em escalas maiores, isto é, de detalhe, ocorrem com maior frequência e menor intensidade. Sabe-se também que, de acordo com Rusnák et al. (2017), a morfologia fluvial é um aspecto paisagístico bastante dinâmico condicionada ao regime de escoamento do rio, índices pluviométricos e interferência antrópica (STEVAUX e LATRUBESSE, 2017; MARÇAL, 2013). As áreas mapeadas apresentam significativo potencial de mudanças com carreamento de sedimentos e migração de formas de leito do rio Jacaré. Assim, considera-se que os presentes mapas, além de expressarem o “retrato” das configurações espaciais existentes na área, expressam as mudanças geomorfológicas de detalhe ao longo do período monitorado, especialmente na ocorrência do aumento da pluviosidade.

A utilização de fotogrametria com VANT como subsídio para análise de microfeições e processos é uma ferramenta eficiente fornece muitas possibilidades de análise do relevo, sobretudo de ambientes fluviais e áreas com acessos limitados, conforme demonstrado por Rusnák et al. (2017), Gao et al. (2017), Beletti et al. (2017) e Carrivick e Smith (2018). A aplicação da chave classificatória elaborada, apesar de trabalhosa e das intercorrências ocorridas em função da falta de um referencial altimétrico, mostrou-se uma ferramenta aplicável e útil para classificação das feições fluviais de detalhe na bacia hidrográfica do rio Jacaré. A proposição para análise geomorfológica com base em sucessivos levantamentos com VANT foi explorada no âmbito desta dissertação como o segundo objetivo específico, que será discorrido no capítulo seguinte.

Em face dos limites tecnológicos que subsidiaram a classificação do relevo, principalmente no que tange a ao mapeamento das menores feições do relevo, como as feições fluviais e depósitos tecnogênicos (ROSS, 1992; PELOGGIA, 1998; LUZ e MARÇAL, 2016), os resultados desta pesquisa trazem a luz novas perspectivas sobre as potencialidades tecnológicas oferecidas pelos VANT.

Argento (2013) destaca a importância dos esforços para criação de um ordenamento de legendas que atendam diferentes perspectivas em macro, meso e microescala. Neste sentido, o esforço empreendido para o mapeamento de alta resolução espacial desenvolvido nesta pesquisa, associa-se a limitação para o estudo de grandes áreas.

Ainda que não tenham sido realizadas as estimativas de erro de posicionamento dos produtos cartográficos (SAMPAIO e BRANDALIZE, 2018), a elevada quantidade e qualidade das informações obtidas por meio do VANT, foram suficientes para construção de uma legenda detalhada e capaz de representar cartograficamente a grande diversidade e volatilidade das microfeições fluviais, com alta resolução espacial e temporal.

Não obstante, ainda que longe de esgotar o assunto, a proposição de legenda do mapeamento, expressa uma importante contribuição às discussões apresentadas por Botelho e Pelech, (2019) e Silva e Santos (2015) e a comunidade geomorfológica, no que tange ao

estabelecimento de métodos capazes de compatibilizar escalas, simbologias e legendas classificatórias para a representação geomorfológica de detalhe.

5.2 Monitoramento e Análise dos Processos Geomorfológicos Fluviais

A presente pesquisa realizou a análise das características morfométricas das feições fluviais ao longo da planície do rio Jacareí por meio de monitoramentos, tendo como preocupação, desenvolver uma oportunidade de avaliar a resposta geomorfológica a eventos de baixa, moderada e alta energia. Utilizaram-se recursos e técnicas convencionais e inovadoras para obtenção de dados.

Este capítulo corresponde ao segundo objetivo específico da pesquisa: associar a utilização de topografia e fotogrametria com VANT para o monitoramento de processos fluviais atuais no rio Jacareí. Para tanto, foi empregado o modelo de mapeamento desenvolvido no âmbito desta pesquisa (primeiro objetivo específico), associado a utilização de topografia convencional. A exemplo de Binda e Fernandez (2011) e Marçal (2013), foram também realizadas associações com o monitoramento pluviométrico.

Destaca-se que, ainda que, em virtude dos desafios interpostos pelas medidas de segurança contra a COVID-19 e as campanhas de campo não terem seguido regularidade trimestral, prevista no projeto desta pesquisa, os dados levantados não foram prejudicados, conforme análise transcorrida nos itens sequenciais neste subcapítulo.

Ao final, foram realizadas 6 campanhas de monitoramento. Os levantamentos topográficos das seções transversais e voo sobre as áreas amostrais foram realizados nos dias 11 e 12/10/2019, 09/01/2020, 14/03/2020, 08/06/2020, 06/11/2020 e 24/01/2021. Os voos longitudinais foram realizados nos dias 03/07/2019, 12/10/2019, 09/02/2020 e 14/02/2020.

O levantamento topográfico com Estação Total foi bastante útil para a representação do perfil das seções transversais, bem como para a análise estatística baseada no método de Olson-Rutz e Marlow (1992), que demonstrou boa correlação com o monitoramento pluviométrico e as constatações em campo. Ainda que exaustivo e sujeito a limitações de acesso em diversos pontos, o levantamento topográfico convencional mostra-se como um recurso eficiente para obtenção de dados precisos, entretanto, limitado quanto ao tempo de levantamento dos dados.

No decorrer do desenvolvimento do perfil longitudinal, muitas formas e processos de menor dimensão se desenvolvem e desaparecem no sistema (STEVAX e LATRUBESSE, 2017). Fato este verificado a partir do imageamento longitudinal do rio, obtido nos dias 04/07/2019, 12/10/2019 e 09/02/2020 (Figuras 41, 42 e 43). Dentre os quais, destaca-se o voo realizado em 09/02/2020, onde é possível observar a remoção e tombamento da vegetação ribeirinha, o alargamento do canal e instalação de feições erosivas nas margens que ocorreram em função do evento pluviométrico mais intenso registrado durante o desenvolvimento desta pesquisa.

Voo Longitudinal sobre o rio Jacareí em 04/07/2019

Escala : 1:2.200

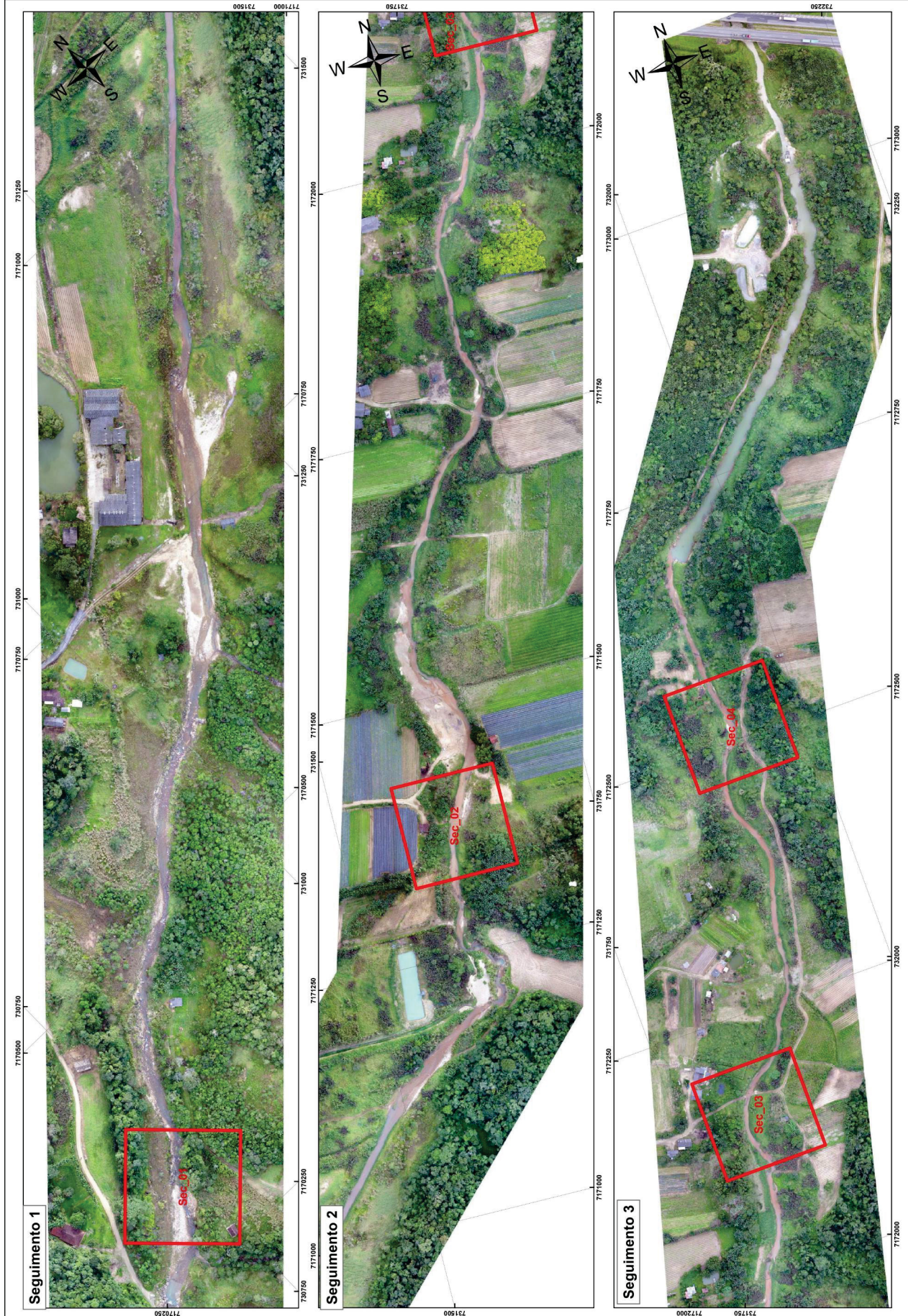


Figura 41 Imagem fotogramétrica longitudinal sobre o rio Jacareí na planície em 04/07/2020

Voo Longitudinal sobre o rio Jacarei em 12/10/2019

Escala : 1:2.200

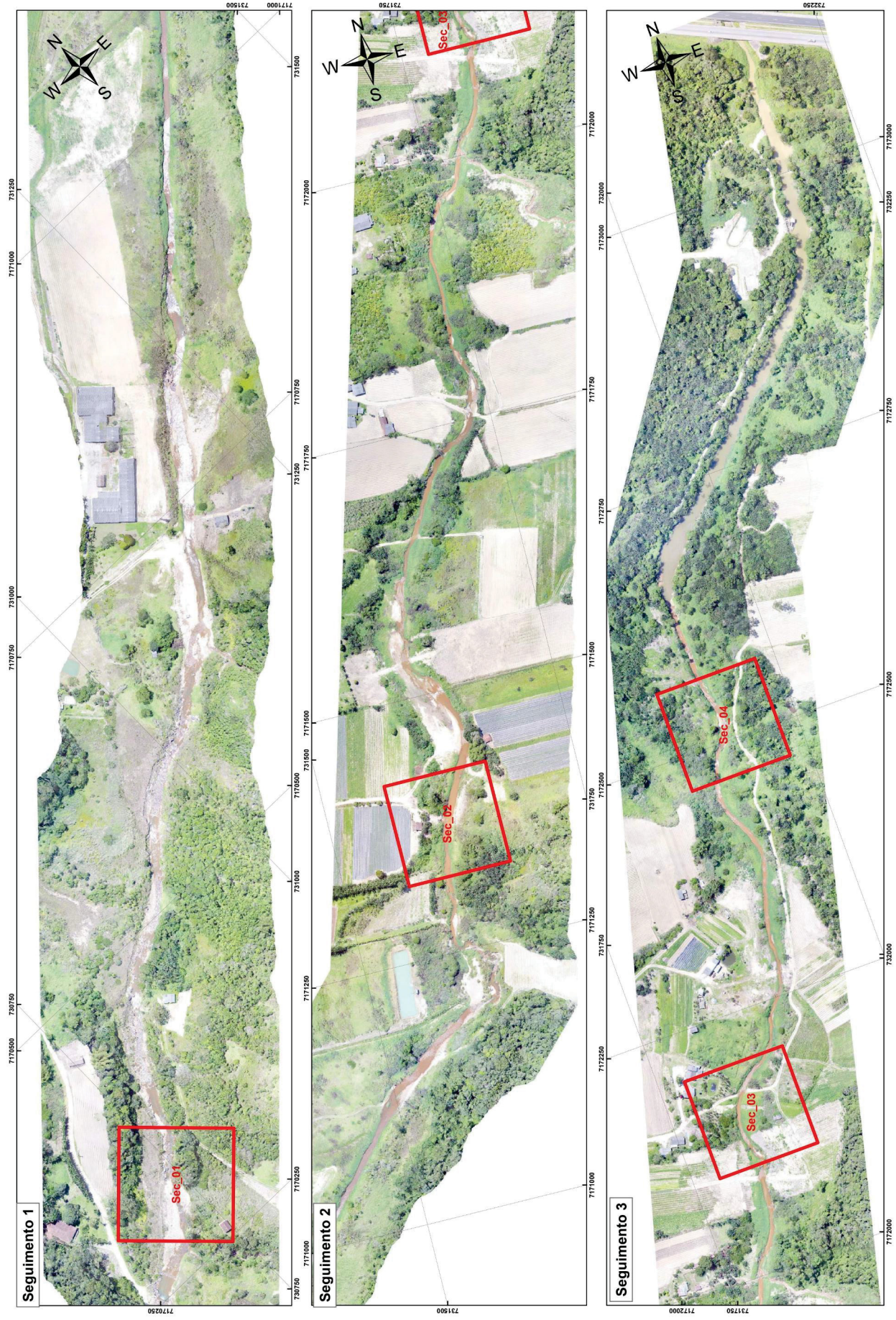


Figura 42 Imageamento fotogramétrico longitudinal sobre o rio Jacarei na planície em 12/10/2019

Escala : 1:2.200

Voo Longitudinal sobre o rio Jacarei em 09/02/2020



Figura 43 Imageamento fotogramétrico longitudinal sobre o rio Jacarei na planície em 09/02/2020

5.2.1 Precipitação

Após coleta e análise de dados de precipitação, foi elaborado o gráfico da Figura 44, o qual ilustra os volumes de precipitação referentes ao período monitorado em comparação à média histórica. Verifica-se na maioria dos meses o registro de chuvas abaixo da média histórica. Isto se deve especialmente em função da configuração de evento *La Niña*, que dentre outros fatores propicia, na região sul do Brasil, volumes de chuva abaixo da média climatológica (SIMEPAR, 2021). Os meses de novembro de 2019, fevereiro, junho e agosto de 2020 são exceções onde foram registradas chuvas acima da média histórica. Destaca-se o mês de fevereiro de 2020 com 353 mm frente a média climatológica de 280 mm.

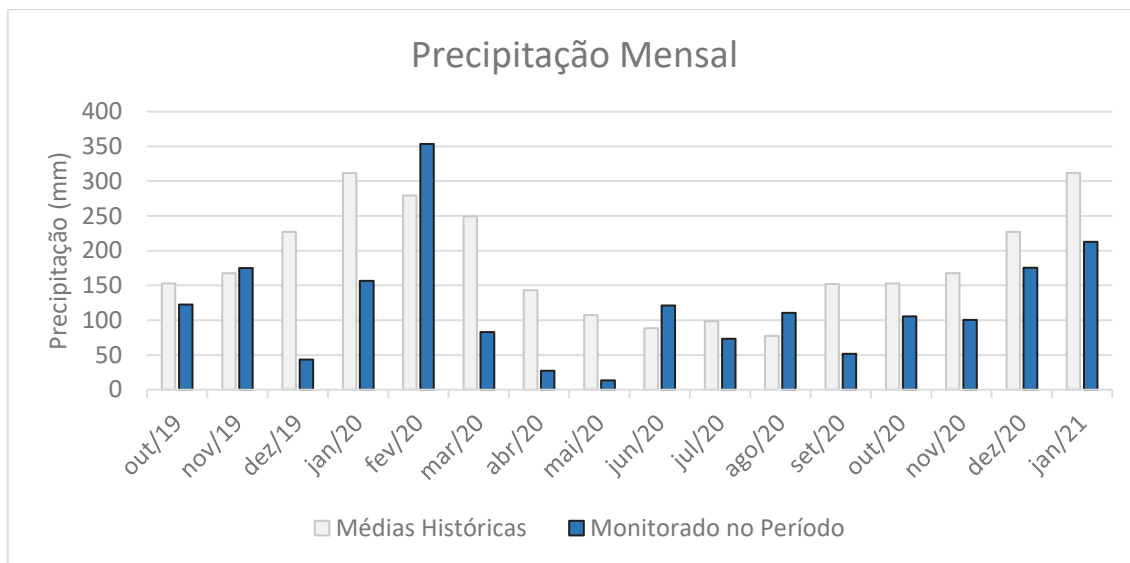


Figura 44 Precipitação mensal e média histórica

A exemplo do estudo de caso desenvolvido por Binda e Fernandez (2011) e Marçal (2013) com base os dados de precipitação coletados nas estações anteriormente mencionadas, foi realizada a caracterização pluviométrica entre as campanhas (Tabela 1).

Tabela 1 Caracterização pluviométrica

<i>Campanha</i>	<i>Período</i>	<i>Intervalo (Dias) T</i>	<i>Precipitação Acumulada (mm) P</i>	<i>Chuva Máxima 24horas (mm)</i>	<i>Dias com chuva</i>	<i>Relação P/T</i>
1 ^a – 2 ^a Campanha	12/10/2019 a 09/01/2020	89	341	55	30	3,8
2 ^a – 3 ^a Campanha	09/01/2020 a 14/03/2020	65	593	80	24	9,1
3 ^a – 4 ^a Campanha	14/03/2020 a 08/06/2020	86	41	22	49	0,5
4 ^a – 5 ^a Campanha	08/06/2020 a 06/11/2020	151	462	41	75	3,1
5 ^a – 6 ^a Campanha	06/11/2020 a 24/01/2021	79	488	43	18	6,2

Fonte: o autor (2021)

Verifica-se que, decorridos 89 dias entre a 1ª e 2ª campanha, houve um volume acumulado de chuva de 341 mm, sendo 175mm registrados em novembro e apenas 44 mm em dezembro. A média histórica para estes meses corresponde, respectivamente, a 167mm e 227 mm respectivamente (Figura 44). Evidencia-se, portanto, que o primeiro período monitorado apresentou registro de chuvas 45% menor do que média histórica, especialmente em função do baixo volume de precipitação ocorrido no mês de dezembro. Ressalta-se a precipitação acumulada em dezembro de 2019 foi a menor registrada na série histórica analisada neste trabalho (desde 1986).

Em face de intensas chuvas que ocorreram na bacia do Jacareí em fevereiro de 2020 e do relato de moradores quanto a ocorrência de inundações e erosões das margens. A 3ª campanha foi antecipada ante o previsto que era 90 dias. Verifica-se, entre a 2ª e 3ª campanha, que apesar do menor intervalo do período monitorado, é grande o volume de precipitação acumulado, registrando 593 mm, fato este, evidenciado pela relação P/T (Precipitação e Intervalo) que foi de 9,1 frente a 0,5 na campanha seguinte. Em relação às médias históricas de precipitação para os meses de 2020, os volumes de chuva registrados mostraram-se abaixo do esperado, com exceção do mês de fevereiro, que registrou um acumulado acima da média e com episódios pluviométricos concentrados no início do mês (Figura 45).

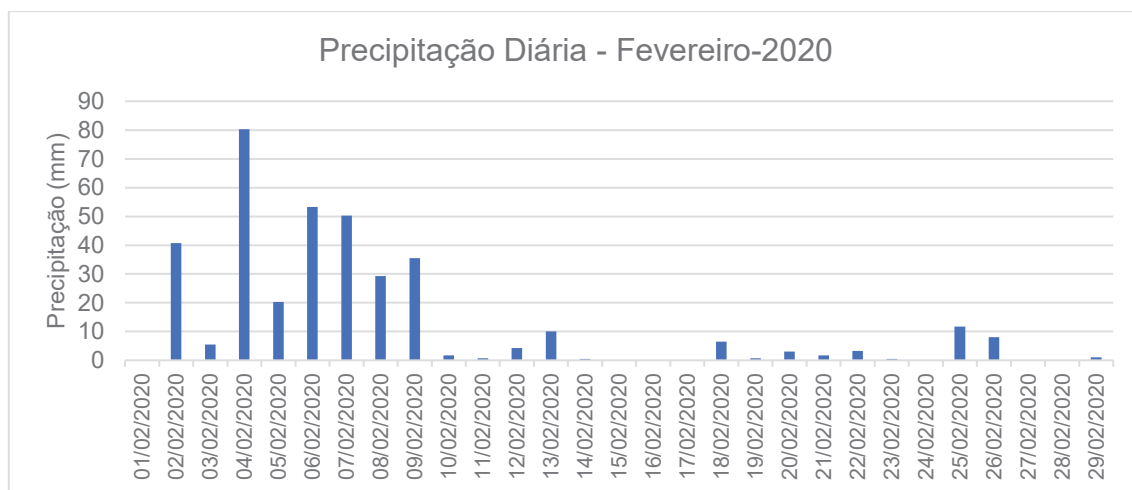


Figura 45 precipitação diária em fevereiro de 2020

Entre a 3ª e 4ª campanha de monitoramento decorreram-se 86 dias. Neste período, compreendido entre os meses de março e junho de 2020, há naturalmente uma redução sazonal do volume de chuvas. Os valores registrados em março, abril e maio, no entanto, ficam significativamente abaixo da média histórica. O acumulado foi de apenas 33% da média esperada para o mês de março, 18% do mês de abril e apenas 10% para o mês de maio. O mês de junho apresentou valores ligeiramente acima da média prevista. Esta campanha representa o período mais seco do monitoramento.

Sabe-se que, de acordo com Hervouet et al. (2011), períodos como esse e ausência de maiores vazões, favorecem o desenvolvimento de vegetação ribeirinha. Esta, por sua vez, tende gerar maior atrito, reduzir a velocidade da água, aumentar sedimentação nas margens dos rios e o estreitamento do canal (STEVAX e LATRUBESSE, 2017).

Em função das medidas de segurança e controle sanitário da pandemia da COVID-19 associadas ao aumento de casos da doença, bem como as restrições de circulação, o cronograma de campanhas do segundo semestre do ano 2020 foram alterados. Assim, a 5ª campanha foi realizada 60 dias de atraso, configurando o maior intervalo de monitoramento pluviométrico (151 dias). A precipitação acumulada neste período foi de 462 mm, entretanto a correlação P/T foi de 3,1. Nesse período, todos os meses monitorados, exceto o mês de agosto, apresentaram precipitações abaixo da média histórica (1986-2015).

A 6ª campanha ocorreu após o intervalo de 79 dias, dos quais, apenas em 18 foram registradas precipitações, sendo 100 mm em novembro, 175 em dezembro e 213 em janeiro. O volume acumulado no período (488 mm) foi 30% menor do que a média histórica.

5.2.2 Seção Transversal 01

A área do entorno da seção 01 localiza-se no início da planície, na região mais a montante e próxima a intersecção da estrada rural principal com o rio Jacaré. Esta área, representa o trecho com a menor influência antrópica recente. A Figura 46 retrata a área monitorada a partir de uma fotografia aérea (Figura 46A) e outra tirada ao nível de solo (Figura 46B).

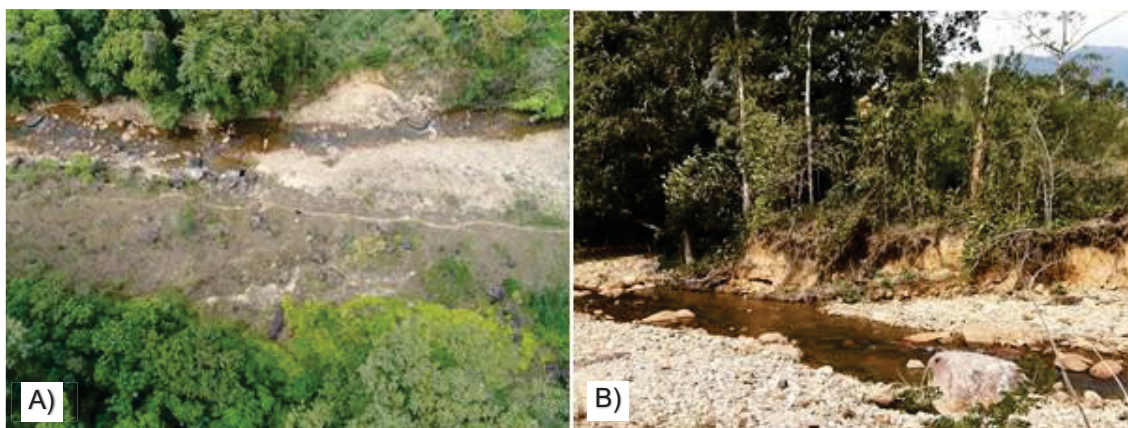


Figura 46 Área de amostragem - seção 01. A) Vista aérea; B) Vista de solo

A margem direita possui um talude com 3,5 metros de altura com face erosiva exposta (Figura 47C). Este talude é sustentado pela zona de raízes da vegetação arbórea local, as quais possuem dossel de até 12 metros. A faixa de APP (Área de Preservação Permanente) é inferior aos 30 metros definidos pelo código florestal. A margem esquerda é composta por rochas, matacões, seixos e sedimentos finos oriundos de inundações e de obras pretéritas, como a retificação do rio em 2012. Com tais materiais foi formado um dique antrópico que eleva o nível de margens plenas e auxilia no controle de cheias do rio. Nesta margem, devido à baixa presença de matéria orgânica, o solo não é desenvolvido e a vegetação é esparsa e arbustiva.

O leito possui corredeiras, é composto por rochas e matacões com presença de blocos maiores, oriundos de eventos pluviométricos mais intensos. Alguns blocos apresentam sinais de fraturamento por perfurações e explosivos. A profundidade média do rio neste trecho, verificada

nos dias de campanhas de campo, é de 15 cm, podendo oscilar rapidamente em volume e velocidade com chuvas ocasionais nas vertentes da bacia (cabeça d'água).

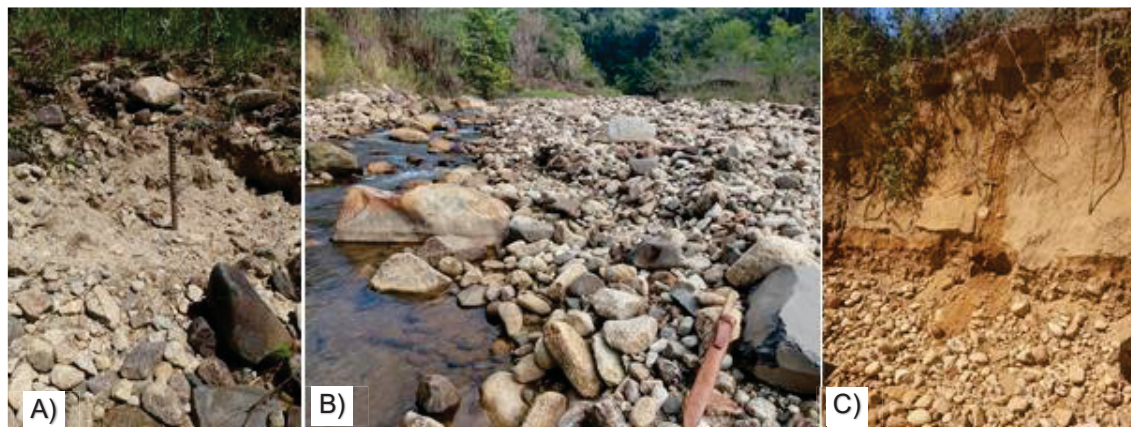


Figura 47 A) Margem esquerda; B) Leito; C) Margem Direita

Foram realizados 6 levantamentos topográficos e 5 voos com VANT nesta seção. A Figura 48 sintetiza os dados obtidos em campo, associa a precipitação registrada durante o intervalo das campanhas e apresenta o resultado da análise da geometria hidráulica da seção transversal conforme critérios estatísticos preconizados por Olson-Rutz e Marlow (1992) e utilizadas por Binda e Fernandes (2011) e Marçal (2013). Os mapas geomorfológicos, por sua vez, estão representados no subcapítulo 5.1.2.

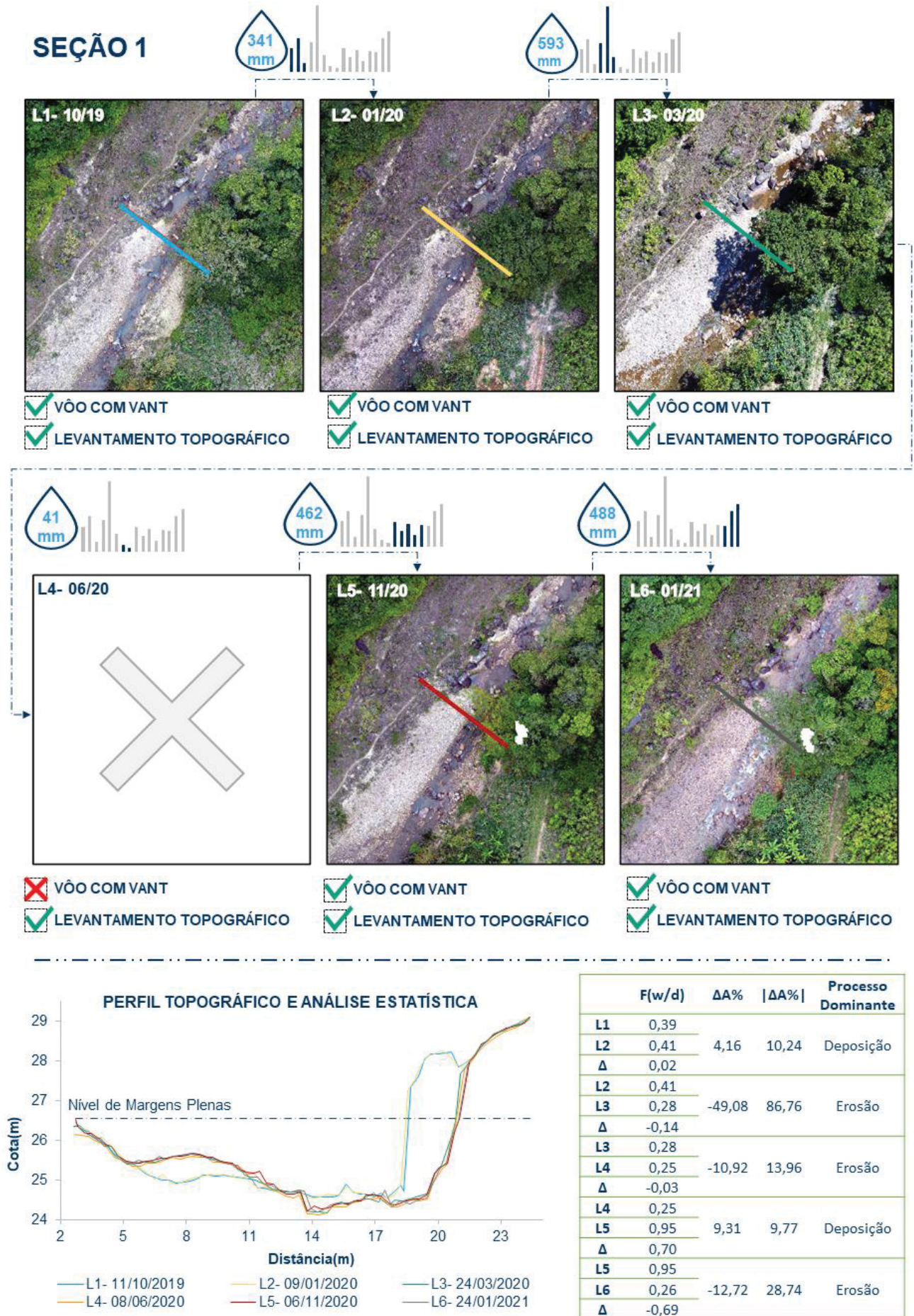


Figura 48 Resumo da análise da geometria hidráulica da seção 01. Onde L1-L6 correspondem aos levantamentos realizados

A obtenção das imagens com VANT durante 4ª campanha não foi realizada em virtude da ocorrência de problemas técnicos relacionados a interferências eletromagnéticas detectadas pelo equipamento, que afetavam demasiadamente sistema de navegação e impossibilitaram o voo. Posteriormente, com auxílio da assistência técnica especializada (M7 Studio Drones – Curitiba/PR), foi verificado que se tratava de problema no equipamento, o qual necessitava de reparos.

Ao realizar testes de processamento das imagens do VANT obtidas nas campanhas anteriores e das demais seções, verificou-se que as cotas altimétricas registradas nos metadados apresentavam graves inconsistências, prejudicando a confecção e utilização de modelos tridimensionais, nesta e nas demais seções. Fato este, que poderia ter sido evitado com a utilização de pontos de controle (GCP - *Ground Control Points*).

Com base na caracterização geomorfológica do entorno da seção 01, verificou-se no primeiro levantamento, que no leito há o predomínio de feição erosiva, com barra detrítica, não vegetada composta por blocos e matacões, em geral maiores que 200 mm de circunferência, chegando a aproximadamente 2 metros. As barras detríticas correspondem a sedimentos residuais depositados durante eventos pluviométricos mais intensos e com posterior seleção de sedimentos menores pelo transporte do fluxo do rio em níveis normais HASS et al. (2020). Na primeira campanha foi possível identificar visualmente pequenos depósitos de areia entre os blocos, no entanto, devido à baixa ocorrência de chuvas e transporte de sedimentos no período, o material de reduzida granulometria, ali depositado, foi transportado pelo rio, configurando assim, o predomínio de processo erosivo.

Na margem esquerda, apesar das áreas com vegetação gramínea, o substrato também é composto por blocos e matacões, misturados a sedimentos grosseiros. Esta área compreende o leito abandonado do rio, que atualmente é coberta pela água apenas durante eventos extremos. A antiga margem do rio apresenta vegetação arbórea remanescente dos intensos eventos pluviométricos de 2011. Em geral, a margem esquerda permaneceu inalterada durante o monitoramento, exceto pelo desenvolvimento de espécies pioneiras da vegetação.

A margem direita corresponde a um terraço, que é conectado à vertente da Serra da Prata. Este terraço é composto por Cambissolos flúvico e apresenta tendência de erosão remontante. Fato este foi verificado pela margem erodida na base pelo fluxo do rio. A vegetação corrobora à estabilidade da margem, com exceção de uma porção coberta apenas por vegetação gramínea, capins, pequenos arbustos e bananeiras esparsas. Esta porção, menos protegida, compreende o contato com a margem do rio. Neste ponto é verificada a ocorrência de erosão remontante e classificada como Erosão em Margem Côncava, não vegetada e com sedimentos finos, sendo esta a classe geomorfológica com maior suscetibilidade à erosão.

A margem direita do rio apresentou as mudanças mais significativas entre a 1ª, 2ª e 3ª campanhas. Primeiramente os proprietários realizaram a supressão de parte da vegetação para construção de uma estrada de acesso para a limpeza do terreno, realizaram um pequeno aterro com resíduos de construção e cortes superficiais do solo. Na 3ª campanha foram verificadas expressivas mudanças na geometria da seção transversal, principalmente na área classificada

como Erosão em Margem Côncava, não vegetada e com sedimentos finos, onde houve um recuo da margem em aproximadamente 2 metros, conforme levantamentos topográficos.

Verificou-se também rebaixamento das cotas mínimas (24,58 metros para 24,21) e uma acreção de 76 cm sedimentos residuais sobre a barra detrítica. Estas mudanças são decorrentes das chuvas concentradas em fevereiro e acumulado de 593 mm no período entre a 2ª e 3ª campanha. Nas campanhas seguintes, não houve mudanças significativas nas feições, fato este, associado ao baixo volume de chuvas, com exceção à última campanha, na qual o rio apresentou nível pouco acima da média diária.

De acordo com as proposições de Olson-Rutz e Marlow (1992), a seção 01 caracteriza-se pela predominância de processos deposicionais na segunda e quinta campanha e erosivos na 3ª, 4ª e 6ª campanhas. O mapeamento geomorfológico possibilitou a distinção e classificação, até o quarto nível, de 21 classes de feições, conforme descrição nos mapas em anexo.

A seção transversal 01 foi a única área amostral que não demandou ajustes da metodologia de levantamento com a ET, perfazendo 6 levantamentos sequenciais, que retratam com clareza os processos atuantes. Fato este, expressado também pela análise estatística aqui empregada.

Verifica-se, portanto, que entre a 1ª e 2ª campanhas (L1 e L2), *Varição Residual da Área* ($\Delta A\%$) oscilou positivamente, indicando a predominância de processos deposicional. Registrou-se também baixa precipitação acumulada no intervalo (341 mm) e relação P/T (3,8). Tendo em vista o episódio pluviométrico registrado em fevereiro de 2020, entre L2 e L3, é possível verificar uma expressiva variação na forma do canal, refletindo em *F* (*índice de forma do canal*), com $\Delta A\%$ em -49,08 que se associa a erosão como processo dominante.

No levantamento seguinte (L3 e L4) destaca-se permanência da erosão como processo dominante, visto trata-se do intervalo com menor precipitação (41 mm) e menor relação P/T (0,5). No levantamento posterior (L4 e L5), o $\Delta A\%$ apresentou variação positiva, demonstrando a estabilidade do perfil.

É preciso destacar também que, segundo Stevaux e Latrubesse (2017), com a redução da deposição dos sedimentos advindos das áreas montantes, há a tendência de instalação de processos erosivos. No último levantamento (24/01/2021), houve o aumento sazonal da precipitação, entretanto, abaixo da média histórica, assim, L6 voltou a apresentar o predomínio da erosão no perfil. Fato este, se associa a característica das barras detríticas, que são feições fluviais erosivas, conforme explicado na chave classificatória.

5.2.3 Seção Transversal 02

A seção 02 está localizada em uma propriedade que abriga uma estação meteorológica de responsabilidade do Instituto Águas Paraná (Latitude -25º,56'; Longitude -48º,70'), desativada desde 2016. O entorno compreende uma residência e lavouras de hortaliças, que utilizam bombeamento da água do rio para irrigação. As margens possuem capoeiras de vegetação pioneira mescladas com capins e bananais. Neste seguimento do rio são ausentes os matacões e corredeiras. O leito é formado principalmente por areia e a profundidade varia da margem

direita para esquerda, de 5 cm a 80 cm. O talude da margem direita possui um desnível suave e é composto por seixos rolados oriundos de depósitos pretéritos, anteriores ao evento de 2011. A margem esquerda possui um desnível de 2,6 metros de altura até o talvegue e é composta por sedimentos finos e muito finos, como areias e argila. Ambos os lados do rio apresentam vegetação arbustiva, gramíneas (braquiária) e bananeiras, conforme representado nas Figuras 49A (foto aérea) e 49B (foto ao nível de solo).

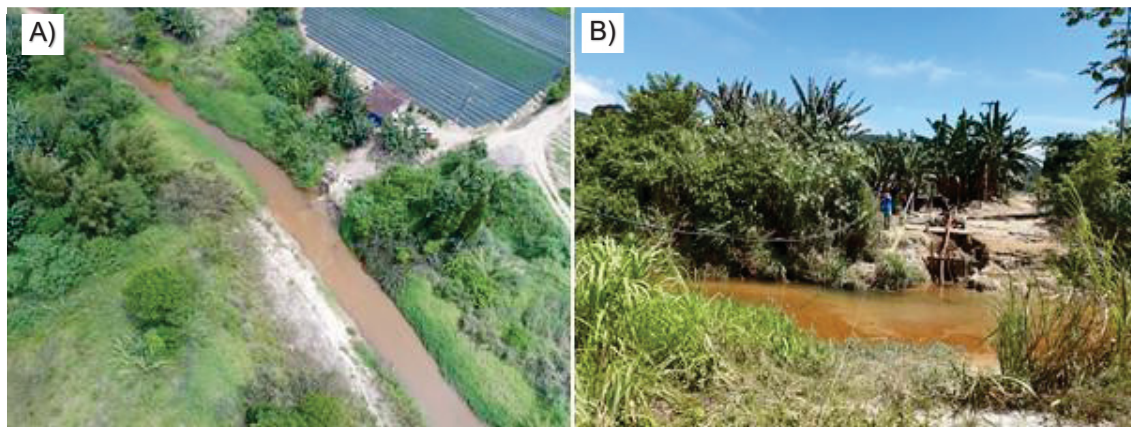


Figura 49 Área de amostragem - seção 02. A) Vista aérea; B) Vista de solo

Assim como realizado na seção 01, nesta área foram realizados 06 levantamentos topográficos, porém efetuou-se 6 voos com VANT. Os dados levantados estão resumidos na (Figura 50). Nesta seção, foi necessária uma mudança no método de coleta de dados entre o primeiro e os demais levantamentos, onde foi realizada a inversão do lado do rio que seria estacionada a ET. Esta mudança foi causada da presença objetos inseridos pelos proprietários sobre linha de visada, entre a base e o prisma. Entretanto, considera-se que não trouxe prejuízos para coleta e análise dos dados.

Ao comparar os dados morfológicos da geometria da seção (Figura 50), obtidos nas seis campanhas, foi possível observar a alternância de períodos de erosão e deposição. O perfil transversal da seção não apresentou variações expressivas durante o monitoramento. Dentre os levantamentos destaca-se o intervalo entre L5 e L6, que apresentou perda de material na área submersa, portando, predomínio de processo erosivo. Isto pode ser explicado pela baixa precipitação média dos meses anteriores, que reduz o transporte de sedimentos a montante, carreando o material disponível para jusante. Isto resultou, portanto, em erosão e rebaixamento do nível de base em aproximadamente 50 cm. Ao mesmo tempo, ocorreu um acréscimo de material sobre a barra lateral ali existente, elevando a cota das barras laterais da feição em 37 cm.



Figura 50 Resumo da análise da geometria hidráulica da seção 02. Onde L1-L6 correspondem aos levantamentos realizados

A erosão nas áreas submersas e deposição sob a barra lateral pode ser explicada pela ocorrência de chuvas mal distribuídas nos meses anteriores e o desenvolvimento progressivo da vegetação nas margens. Vegetação esta, que segundo Hervouet et al. (2011) e Stevaux e Latrubesse (2017), aumenta a taxa de sedimentação nas margens e promove o estreitamento do canal. Sabe-se que durante o aumento das vazões, aumenta também transporte de sedimentos. À medida que a vazão diminui, os sedimentos decantam (BINDA e FERNANDEZ, 2011). Sob vazões normais, os sedimentos do leito são continuamente transportados, porém de forma mais lenta. Já os que decantam entre a vegetação ficam retidos até a ocorrência de vazões maiores.

Para a área do entorno da seção 02, o mapeamento geomorfológico possibilitou a classificação até o quarto nível, de 26 classes de feições distintas, conforme descrição nos mapas das Figuras 32, 33 e 34. Com base na análise do mapa, ocorreram mudanças no desenvolvimento da vegetação próxima a residência e nas margens do rio. Na vegetação ribeirinha, formada por capins, a altura varia de alguns centímetros até 3 metros. Devido às raízes superficiais, a vegetação tomba facilmente sobre o rio, aumentando o atrito da água e a sedimentação nas margens.

Ao observar os mapas das Figuras 32, 33 e 34 do subcapítulo 5.1.2 é possível verificar a alternância da largura do canal, ao ponto que o levantamento realizado em novembro de 2020 apresenta maior estreitamento do canal e desenvolvimento da vegetação. Considerando as baixas precipitações nos meses anteriores, justifica-se o estreitamento do canal com base em Hervouet et al. (2011), que apontam que períodos como ausência de maiores vazões, favorecem o desenvolvimento de vegetação ribeirinha. Essa alternância, bastante nítida a partir do mapeamento, coincide com o resultado da análise estatística (OLSON-RUTZ e MARLOW, 1992), que aponta o predomínio de deposição em novembro de 2020.

Sabe-se, no entanto, que a área com vegetação ribeirinha é condicionada a diversos fatores, como: climáticos, biológicos, antrópicos e vazões máximas que podem tombar ou remover a vegetação. Tais fatores não foram analisados no âmbito desta pesquisa. Pode-se observar a boa efetividade do método de Olson-Rutz e Marlow (1992) quantificar e analisar as mudanças topográficas na geometria da seção transversal.

5.2.4 Seção Transversal 03

O local definido para seção 03, durante a elaboração do projeto da corrente pesquisa, foi escolhido mediante a possibilidade de compartilhamento de dados e associação de resultados com os monitoramentos realizados no âmbito do projeto de pesquisa² voltado à estimativa da

² O projeto de pesquisa em questão é desenvolvido em parceria entre o LAGEAMB (Laboratório de Geoprocessamento e Estudos Ambientais da Universidade Federal do Paraná, com a empresa EnvEx Engenharia e Consultoria, sob financiamento da Terminal de Contêineres de Paranaguá (TCP), no âmbito da condicionante ambiental apresentada pela Prefeitura de Paranaguá durante o processo de ampliação do empreendimento.

produção de sedimentos da bacia do rio Jacareí, que manteve no local, até fevereiro de 2020, uma estação para monitoramento pluviométrico e fluviométrico.

A seção 03 está localizada em área com histórico de sucessivas intervenções e mudanças na calha do rio. Segundo o proprietário, nos anos 1980 a 2000 era realizada a extração de areia no leito e na planície adjacente. Comenta ainda que, após obras de aprofundamento e retificação do rio em 2012, houve o deslocamento lateral das margens em aproximadamente 10 metros para a esquerda. Denotou-se, portanto, desde o início das pesquisas, o potencial de ocorrência de processos geomorfológicos acelerados nesta área.

Na área ocorre a produção de hortaliças, que utiliza água do rio para irrigação da lavoura. No ponto de captação de água, próxima ao perfil monitorado, a sucção do bombeamento provoca um aprofundamento do leito adjunto a margem esquerda, que pode ser verificado no perfil topográfico da seção (Figura 51). Há também uma estrada rural que cruza o leito, cuja manutenção é realizada com a pavimentação com blocos e matacões.

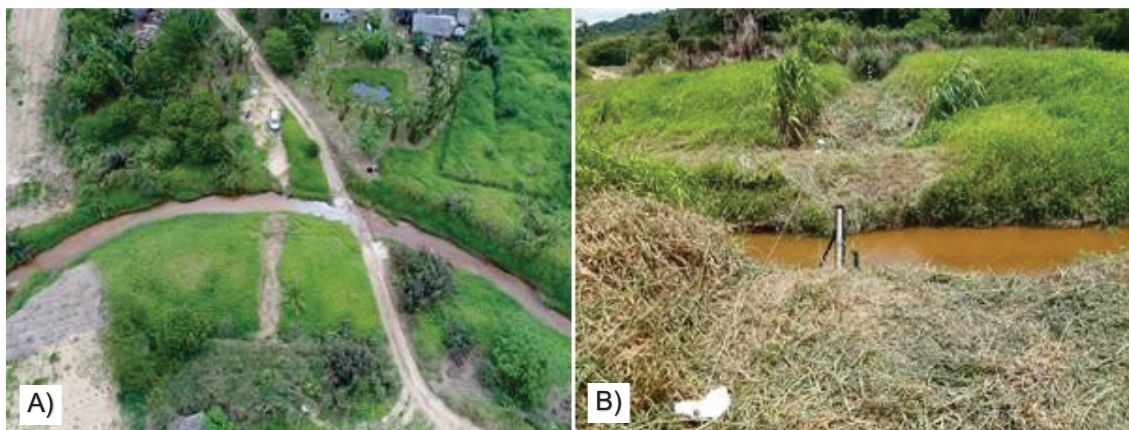


Figura 51 Área de amostragem - seção 03. A) Vista aérea; B) Vista de solo

Ressalta-se que o episódio ocorrido em 02/02/2020 apresentou 80 mm de precipitação em 24 horas e alagamentos em vários pontos da planície, conforme mencionado no item 5.3.1. Logo após a ocorrência das chuvas, em 09/02/2020, foi realizado um voo longitudinal com VANT para o registro das mudanças ao longo do rio na planície. Dentre os pontos mais impactados, destaca-se o seguimento do rio no entorno da seção 03 (Figura 52).



Figura 52 Impacto das chuvas na área amostral 3. A) Imagem aérea em 12 outubro de 2019. B) Imagem aérea em 09 fevereiro de 2020.

O aumento da vazão ultrapassou o nível de margens plenas e promoveu mudanças significativas na geometria do rio, danificou a estrada de acesso às lavouras e instrumentos da estação de monitoramento, reduziu as cotas mínimas do rio, ampliou a distância entre as margens e removeu os pontos de referência para repetição de novos levantamentos do perfil. Importa dizer que estas mudanças (migração da margem) podem estar associadas ao ponto de sucção da água para irrigação, que antes do evento, apresentava uma concavidade no entorno do ponto de captação.

A estrada de acesso foi recuperada e o talude foi preenchido com rochas e terraplenagem. A estação de monitoramento foi desativada e transferida para outro ponto da bacia. Por fim, em função das profundas mudanças e contínuas intervenções antrópicas para manutenção do acesso e estabilidade do talude, bem como perda do ponto de referência dos levantamentos e ausência de autorização para continuidade do monitoramento na área, o monitoramento nesta seção foi interrompido a partir do mês de março de 2020. Registros posteriores desta seção referem-se apenas ao voo fotogramétrico realizado em janeiro de 2021.

Sendo assim, foram realizados 3 levantamentos topográficos e 4 voos com VANT na seção 03 (Figura 53). Ao analisar os dados com base em Olson-Rutz e Marlow (1992) foi possível observar uma relativa estabilidade com prevalência de deposição entre L1 e L2, e abrupta mudança na geometria no L3, apresentando migração lateral da margem esquerda em 5,8 metros em relação ao levantamento anterior. A largura do canal variou de 3,1 metros, em janeiro de 2020, para 10,05 metros, em março de 2020. Próximo à margem direita, houve o soterramento do leito antigo com 43 cm de material, e em direção a margem esquerda, adjunto ao talude, ocorreu um aprofundamento do canal onde concentram-se os fluxos.



Figura 53 Resumo da análise da geometria hidráulica da seção 03. Onde L1, L2 e L3 correspondem aos levantamentos realizados

Com base no mapeamento geomorfológico da paisagem fluvial nos mapas das Figuras 35, 36 e 37, no subcapítulo 5.1.2, entre os levantamentos 1 e 2, verificam-se poucas mudanças na área, que em geral são associadas ao desenvolvimento da vegetação e mudanças no uso do solo

Destaca-se, no entanto, o levantamento 3, onde é possível verificar que as mudanças apontadas pelo levantamento topográfico compreendem toda a extensão da área monitorada. O rio apresentou o alargamento das margens, assoreamento e formação de barras centrais não vegetadas com sedimentos grosseiros, como cascalho e seixos.

O mapa do mês de março expressa a dimensão das áreas afetadas pelas chuvas do mês anterior. Com destaque a formação de talude com mais de 3 metros de altura, classificado como erosão, margem concava, não vegetada e com sedimentos finos. Nos meses anteriores, esta margem apresentava vegetação arbustiva e arbórea.

Em geral, verifica-se também uma tendência de formação de barras lateral e centrais, associadas a escombros lenhosos ou não. Estes escombros, causam turbulência na água e resultam em formas alongadas de deposição a jusante do fluxo (STEVAUX e LATRUBESSE, 2017).

Durante a realização da última campanha (24/01/2021) foi autorizado pelo proprietário a realização de um novo voo com VANT. Com base neste voo, foi produzido um mapa adicional. Nele é possível verificar mudanças na cobertura do solo, sobretudo no que tange ao desenvolvimento de vegetação ribeirinha nas áreas erodidas em março de 2020. Verifica-se também a formação de depósitos de barra lateral sem vegetação estabilizadora. Barras centrais que haviam surgido em março de 2020 foram erodidas.

5.2.5 Seção Transversal 04

A seção transversal 04 compreende área plana associada a solos hidromórficos. Está localizada à montante da rodovia BR 277 (Figura 54A), a qual diante dos movimentos de massa ocorridos em março de 2011 (SILVEIRA et al., 2013), atuou como barreira para a grande quantidade de lama e detritos carregados pela força da água. A ponte sobre a rodovia exerce um controle topográfico para o nível de base do rio Jacaré, e atua como um limitador para o escoamento, resultando, portanto, em maior retenção dos fluxos e sedimentação a montante da ponte.

Tendo em vista o acúmulo de sedimentos, uma draga de extração de areia para construção civil atua nesta região da bacia (Figura 54B). A draga é licenciada sob o processo minerário 826490/2014 (SIGMINE, 2021). A dinâmica de operação da draga é associada aos processos sedimentares que ocorrem na bacia. A cava de extração de areia é localizada dentro do rio, com profundidade que varia entre 2 e 4 metros, a depender do volume de material carregado pelo rio. Quando ocorrem menos chuvas e menor transporte de sedimentos para dentro da cava, a draga avança a montante para manutenção dos volumes de extração, causando significativas mudanças nas características e geometria do rio.

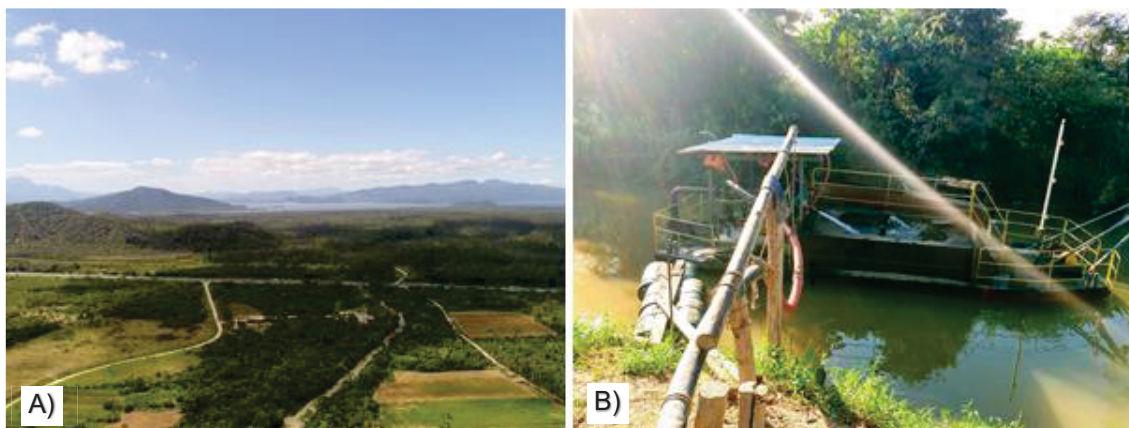


Figura 54 A) Planicidade da área próxima à seção 04 e Rodovia BR277; B) Drega em operação na proximidade da seção 04

Dado o contexto da região da bacia onde se localiza a seção 04, pode-se avaliar e compreender a dinâmica que ocorre na área monitorada (Figura 55). Verificou-se, portanto, que ao longo da pesquisa incidiram sobre o trecho monitorado, diversas mudanças associadas a processos naturais e às intervenções antrópicas.

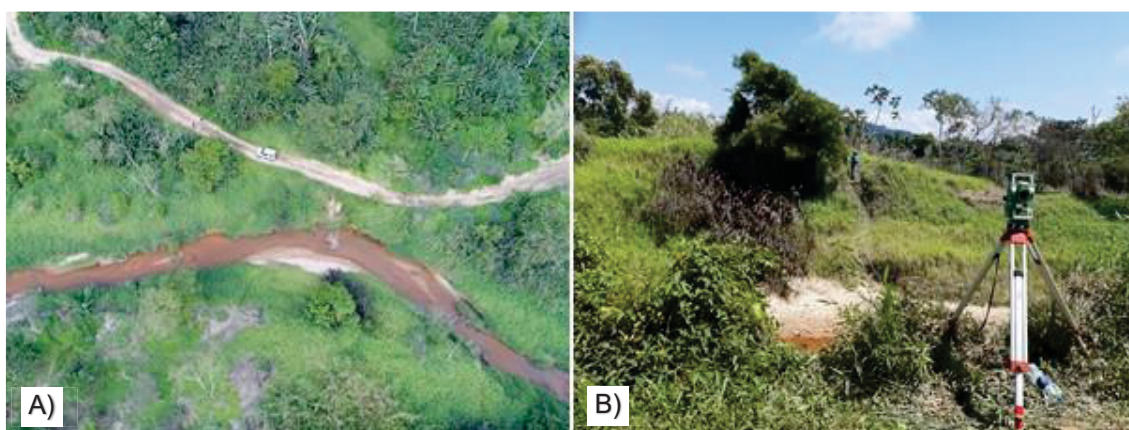


Figura 55 Área monitorada - seção 04. A) Vista aérea; B) Vista de solo

Na seção 04 foram realizados 4 levantamentos topográficos e 6 voos fotogramétricos. Os levantamentos topográficos de outubro de 2019 e janeiro de 2020, no entanto, foram descartados devido a falhas nos dados. Já os levantamentos de novembro de 2020 e janeiro de 2021 não foram realizados devido ao avanço da área de atuação da draga, o que tornou as áreas de estacionamento da estação total e caminhamento com o prisma inacessíveis. Foi realizada a análise estatística de Olson-Rutz e Marlow (1992) somente para os levantamentos de março e junho de 2020. A Figura 55 resume os principais dados obtidos a partir dos levantamentos realizados.

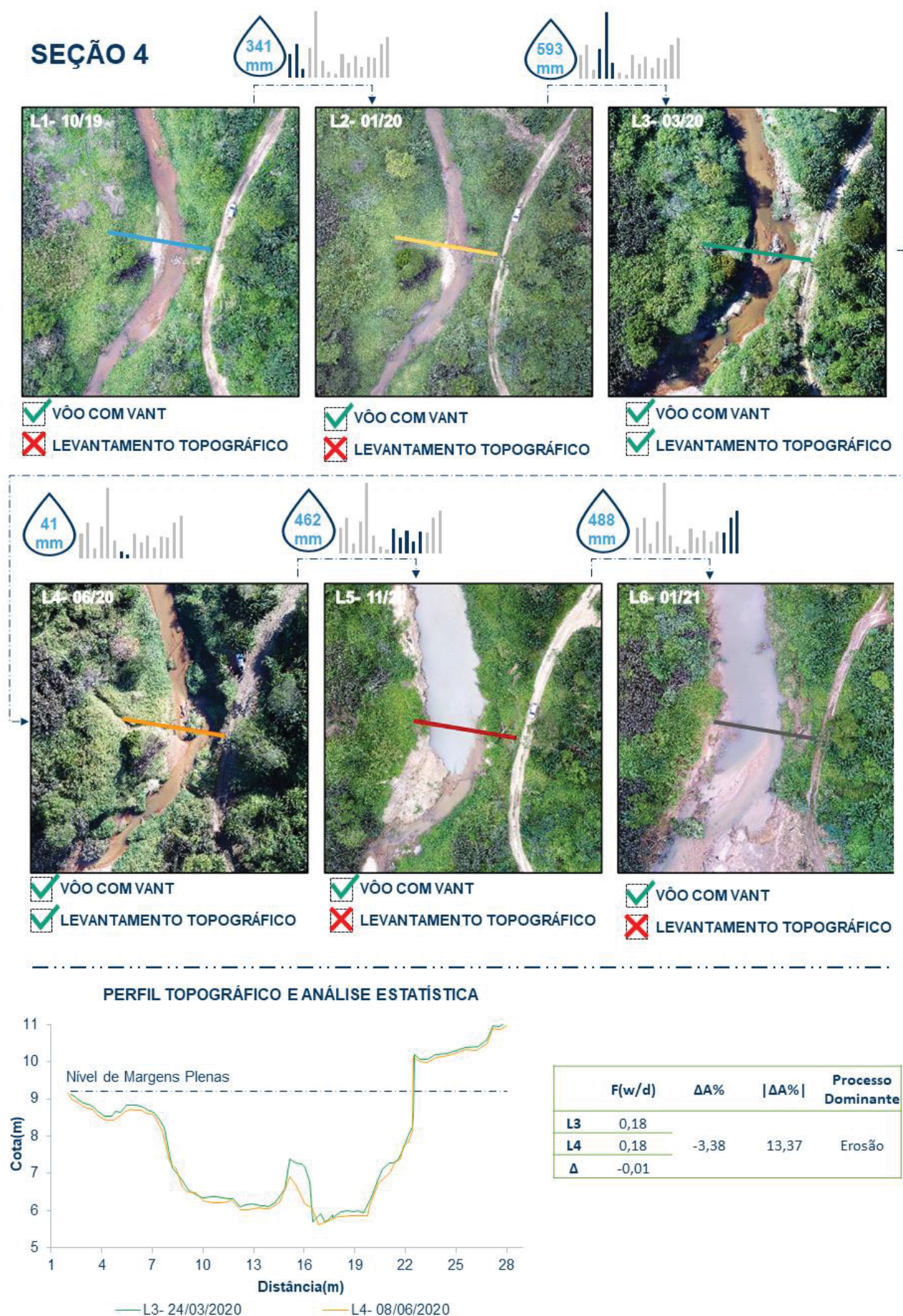


Figura 56 Resumo da análise da geometria hidráulica da seção 04. Onde L1-L2 correspondem aos levantamentos realizados

Ainda que se tenham utilizado apenas dois levantamentos sequenciais no monitoramento da seção 04, verifica-se que a relação entre a *Variação Residual da Área* ($\Delta A\%$) resultou em valores negativos, indicando a predominância de processos erosivos. Registrou-se também baixa precipitação acumulada no intervalo de tempo entre campanhas (41 mm) e menor relação P/T entre os períodos monitorados.

É preciso destacar também que, sob menores volumes de precipitação, há diminuição da vazão e redução do volume de sedimentos transportados pelo rio (STEVAUX e LATRUBESSE, 2017). Com a redução da deposição dos sedimentos advindos das áreas montantes, há a tendência de instalação de processos erosivos. Esta mesma dinâmica foi verificada em todas as seções monitoradas.

O Índice de Forma do Canal (F) apresentou valores reduzidos, o que, de acordo com Olson-Rutz e Marlow (1992), expressa canal estreito e profundo. A *Variação do Total da Área da seção* ($|A\%|$) apresentou o valor de 13,37% de variação do perfil. Tal mudança, no entanto, é associada a redução da cota sobre uma barra central formada por escombros no leito do rio.

Com o mapeamento Geomorfológico (FIGURA 38, 39 e 4), foi possível monitorar a evolução das mudanças da paisagem fluvial desde outubro de 2019 até janeiro de 2021. Em outubro de 2019 e janeiro de 2020, o trecho do rio mais a montante na área monitorada apresentava curvatura suave para a direita, com taludes baixos do lado direito, para onde tende a curvatura do rio, e talude com aproximadamente 3 metros do lado esquerdo, onde tendem a ocorrer processos erosivos. O trecho central, apresentava a margem direita com feição erosiva convexa, com talude de 4,3 metros de altura, pouco vegetada e com erosão na base. A margem esquerda apresentava mesma altura, porém com inclinação suave, tendendo à formação de barra de pontal.

Atualmente, o trecho a jusante apresenta-se retilíneo, com vegetação nas margens, as quais possuem aproximadamente 4 metros. Em geral, o leito é irregular devido a deposição de escombros que provocam turbulências no fluxo da água e diferenças na distribuição de forças erosivas (STEVAUX e LATRUBESSE, 2017).

O destaque para as mudanças na área monitorada se dão, primeiramente, em função das precipitações registradas entre janeiro de março (593 mm), que promoveram diversas mudanças das feições, tanto em composição, quanto estrutura e localização. Como exemplo, uma feição que em outubro de 2019 foi classificada como Deposição em Barra de Pontal, não vegetada e com sedimentos grosseiros, possuía 57 m². No segundo levantamento, essa mesma feição foi reduzida à uma área de 34,4 m². Em março, após as chuvas, essa feição foi totalmente erodida ao ponto de constituir uma margem convexa.

Destaca-se um ponto a montante, onde, em março, houve a formação de barra de pontal com 186,8 m², composta por sedimentos grosseiros advindos dos fluxos intensificados nas chuvas recentes. Esclarece-se que, com a formação dessa feição com sedimentos grosseiros, ou seja, resistentes ao transporte promovido pelas vazões médias do rio, o canal sofreu uma migração lateral e iniciou processo de erosão na base na margem esquerda, transformando-se em feição erosiva em margem côncava, não vegetada com sedimentos finos.

Entre as 3ª e 4ª campanhas, período com precipitações abaixo da média histórica, a área não apresentou significativas mudanças, exceto pelo desenvolvimento de vegetação nas margens e sobre as barras centrais. Notou-se também formação de depósitos alongados a jusante de escombros mapeados anteriormente.

As mudanças mais expressivas são verificadas nos levantamentos de novembro de 2020 e janeiro de 2021, quando, em função da redução de disponibilidade de sedimentos no interior da cava de mineração de areia no trecho a jusante da área monitorada, a draga avançou a montante no rio. Em função disso houve o aprofundamento do leito e avanço lateral de 9,5 metros sobre a margem na área monitorada. A escavação atingiu o marco instalado para o monitoramento do perfil do rio e inviabilizou continuidade dos levantamentos topográficos com estação total.

Tucci (2005) menciona que qualquer mudança nas condições naturais de um rio causa um correspondente reajustamento do nível de base. Dentre elas, destaca-se a erosão regressiva, que aumenta o potencial erosivo do sistema remontante (SUGUIO, 2003). Com base nisso, pode-se afirmar que entalhamento do rio a montante da cava apresenta relação com as escavações no leito promovidas pela draga.

É importante destacar a existência de lavouras próximas ao rio, porém fora da área monitorada. A irrigação dessas lavouras era realizada com o bombeamento de água de uma lagoa, classificada no mapeamento como FLUXO DE BASE em ZONA AQUÁTICA, vegetada com gramíneas e com sedimentos finos (3.14.2.3). Na campanha realizada em junho de 2020, foi verificada a instalação de um novo ponto de captação de água no rio. Frente a isso, verificou-se volume reduzido de água na lagoa, demandando, portanto, captação para irrigação direta do rio.

Cunha (2012) explica que o aprofundamento do nível de base dos rios provoca o rebaixamento do nível piezométrico, drenando a planície de inundação. A mudança no volume de água no solo, por sua vez, afeta o desenvolvimento de florestas de várzea, terras baixas e manguezais, prejudicando a fauna e flora de tais ecossistemas. Com base nisso, associa-se o secamento da lagoa mapeada com o rebaixamento do nível de base do rio promovido pelas obras de retificação e pelos impactos da dragagem a jusante.

Com base em Suguiu (2003), Tucci (2005) e Stevaux e Latrubesse (2017) sabe que o rio busca reestabelecer seu equilíbrio dinâmico. Assim, foi verificado, a partir do mapeamento geomorfológico, a formação de concavidades e convexidades que tendem a acentuar a curvatura do rio e o meandramento do canal. A tendência de meandramento do canal é reforçada pelas características planas do relevo e vestígios de feições meândricas abandonadas visualizadas por imagens aéreas (Figura 57).



Figura 57 Identificação de feição meândrica abandonada pelo rio Jacareí, em decorrência de obras de retificação do canal principal

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente pesquisa buscou compreender como se dá a atuação dos processos geomorfológicos fluviais de detalhe no trecho de planície litorânea do rio Jacareí. Apresentou proposições metodológicas para o mapeamento e classificação taxonômica das feições fluviais e associou a utilização de topografia e fotogrametria com VANT, para o monitoramento de processos fluviais atuais no rio Jacareí. Foram apresentados também os dados sobre as mudanças das feições fluviais em quatro seções transversais monitoradas entre outubro de 2019 e janeiro de 2021. Foram produzidos 21 ortomosaicos com resolução espacial de 1.7 centímetros, possibilitando um inédito mapeamento de feições fluviais com escala 1:80.

Os resultados obtidos nos sucessivos levantamentos de campo e na caracterização geomorfológica das quatro seções transversais materializadas, permitem afirmar que as constantes mudanças no leito e nas margens do rio Jacareí estão condicionadas ao regime de escoamento, índices pluviométricos e a interferências antrópicas. Ainda que, em função do fenômeno *La Niña*, tenham sido registrados volumes de precipitação abaixo da média histórica, os dados obtidos expressam a relação das características das feições fluviais com o aumento ou redução das vazões do rio. Verificou-se também, que se trata de uma bacia de rápida resposta hidrológica. Não obstante, as intervenções antrópicas e a ausência de vegetação arbórea nas margens, desencadeiam processos que se acentuam com a variação da precipitação.

A partir da análise dos dados obtidos no monitoramento, verificam-se características condicionadas a energia das vazões, com a prevalência de processo deposicional, estreitamento do canal e desenvolvimento da vegetação ribeirinha quando em períodos mais secos. A utilização de parâmetros estatísticos permitiu apresentar de forma quantitativa a dinâmica das mudanças topográficas nas seções transversais e a alternância de processos dominantes associados à variação pluviométrica.

A seção transversal número 01, localizada mais a montante na área de estudo, expressou a prevalência de processos erosivos. Visto que se trata de trecho com maior energia das vazões médias, sua margem direita é côncava e não vegetada, portanto, com maior suscetibilidade a erosão. Neste ponto, a energia potencial do fluxo hídrico é suficiente para transportar apenas os sedimentos finos e grosseiros. Blocos e matacões que pavimentam o leito, no entanto, necessitam de aumentos expressivos na vazão e energia potencial para serem transportados. Vale destacar também, que a seção número 04, localizada mais a jusante na área de estudo, também apresentou características erosivas, todavia, relacionadas a intervenções antrópicas. Em face disso, ocorre o aprofundamento do leito e do nível de base do rio, que, por sua vez, resultam no rebaixamento do nível piezométrico, afetando a disponibilidade de água para vegetação da planície marginal.

A seção transversal número 02 apresentou maior estabilidade, entretanto, frente aos intervalos com menor precipitação, foi possível verificar a ocorrência de depósitos longitudinais, isto é, barras laterais, associadas ao desenvolvimento de vegetação ribeirinha, processo este que corrobora para o estreitamento do canal. A seção transversal número 03, por sua vez, com a ocorrência de um evento pluviométrico registrado em fevereiro de 2020, apresentou

expressivas mudanças na geometria do canal, impossibilitando a continuidade do monitoramento topográfico.

A proposta de classificação e mapeamento geomorfológico é uma iniciativa que permite compreender e analisar o potencial da utilização de imagens de VANT para a geomorfologia fluvial. Assim, a utilização de imagens de altíssima resolução para o mapeamento geomorfológico das feições fluviais no rio Jacaréí, combinadas com a proposta de chave classificatória aqui desenvolvida, permitiu distinguir 52 classes de feições, sendo 30 delas com características deposicionais, 15 erosivas e 7 associadas a dinâmica do fluxo de base e áreas submersas.

A utilização de fotogrametria com VANT como subsídio para análise de microfeições e processos geomorfológicos é uma ferramenta eficiente e fornece muitas possibilidades de análise do relevo, sobretudo em paisagens fluviais e áreas com acesso limitado. É preciso, no entanto, chamar a atenção para a necessidade de utilização de pontos de controle em solo. A insuficiência de pontos utilizada na presente metodologia, inviabilizou a correta sobreposição dos levantamentos com VANT, a comparação entre os MDS e a álgebra entre os mapas rasterizados. Sobre esta questão, Gao et al. (2017) e Zanetti et al. (2016) explicam que são necessários ao menos três pontos de controle de solo (GCP - *Ground Control Points*) para o estabelecimento de referência espacial e posicional, assim quanto maior a quantidade de pontos, e mais bem distribuídos pela área, maior será a acurácia. Desta forma, recomenda-se, em trabalhos futuros, a utilização de um número maior de GCP.

As feições erosivas concentram-se nas margens do rio, muitas vezes formando talude côncavo. A perpendicularidade dos ortomosaicos não consegue representar tal feição, inviabilizando seu dimensionamento. A utilização de curvas de nível pode auxiliar a representação tridimensional das feições. Para tanto, faz-se necessário o emprego de MDT.

A fotogrametria baseada em *SFM* potencializa de forma significativa a capacidade de análise da geomorfologia de detalhe. Os MDS, confeccionados a partir das nuvens de pontos densa, são produtos adequados para reconstrução tridimensional da paisagem. Entretanto, foram verificadas nas tentativas de confecção de MDT, a partir da interpolação da nuvem de pontos, limitações quanto à classificação de pontos de terreno com cobertura vegetal densa, inviabilizando a análise de mudanças topográficas a partir dos MDT.

A presente pesquisa buscou compreender como se dá a atuação dos processos geomorfológicos fluviais de detalhe no trecho de planície litorânea do rio Jacaréí. Apresentou proposições metodológicas para o mapeamento e classificação taxonômica das feições fluviais e associou a utilização de topografia e fotogrametria com VANT para o monitoramento de processos fluviais atuais no rio Jacaréí.

As imagens do VANT permitem a identificação de uma grande diversidade de feições. Tal diversidade é incompatível com as atuais propostas de classificação do relevo. Justificando, assim, a necessidade de elaboração de novas propostas de classificação que contemplem as microfeições e processos em escala espacial e temporal mais detalhada.

Enfatiza-se a emergência da fotogrametria baseada em *SFM* como uma ferramenta que corrobora na busca pela obtenção mais eficaz e sistemática dos dados geomorfológicos e a análise das formas de detalhes na paisagem. Esta tecnologia pode ainda ser combinada a novos

algoritmos que realizam a classificação automatizada de sedimentos, vegetação e objetos superficiais no solo e sob a água, permitindo, portanto, novas análises sobre depósitos tecnogênicos, feições e processos fluviais.

7. REFERÊNCIAS

- AB'SÁBER, A. N. **Domínios morfoclimáticos e províncias fitogeográficas no Brasil**. Orientação, São Paulo, n. 3, p. 45-48, 1967. [Republicado em Grandes paisagens brasileiras. São Paulo: Eca, 1970; e como parte do artigo "Províncias geológicas e domínios morfoclimáticos no Brasil". Geomorfologia, São Paulo, n. 20, p. 1-26, 1970b.
- AB'SABER, A. N. **Os Vários Brasis**. Documentário. Dir. Isa Grinspum Ferraz. 20 min. Ano 2001. Disponível em: https://canalcurta.tv.br/filme/?name=os_varios_brasis_por_aziz_absaber. Acesso em 30 de julho de 2020.
- AB'SÁBER, A. N. Províncias geológicas e domínios morfoclimáticos no Brasil. **Geomorfologia**, São Paulo, n. 20, p. 1-26, 1970a.
- ABER, J. S. MARZOLFF, I. RIES, J. B. ABER, S.E.W.; Chapter 1 - Introduction to Small-Format Aerial Photography and Chapter 14 - Gully-Erosion Monitoring, Editor(s): _____, Small-Format Aerial Photography and UAS Imagery (Second Edition), Academic Press, 2019, Pages 259-271, ISBN 9780128129425, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812942-5.00014-8>.
- AB'SABER, A. N.; **Os Domínios de Natureza No Brasil** - Potencialidades Paisagísticas. São Paulo SP. Ateliê Editorial: 2003
- ALLEN, J. R. L. Sedimentary Structures, Their Character and Physical Basis. *In: Developments in Sedimentology*. 30. v1. Amsterdam: Elsevier Science Publisher, 1982. 662 p.
- ALMEIDA, F.F.M.; CARNEIRO, C.D.R. Origem e evolução da Serra do Mar. **Revista Brasileira de Geociências**, n.28, v.2, p.135-155, 1998.
- ALVES, R. R. **Monitoramento evolutivo de seções transversais**: análise estatístico-morfométrica de perda de solo e da qualidade da água em voçoroca no município de Uberlândia-MG. 106 p. Dissertação (Mestrado em Geografia). Instituto de Geografia. Universidade Federal de Uberlândia. Ano 2005.
- ANAC. Agência Nacional de Aviação Civil. **Regras Sobre Drones**. 2017
- ANGULO, J.R; SOARES, C.R; MARONE, E; SOUZA, M.C; ODRISKI, L.L.R; NOERNBERG, M.A. **Paraná**, in: **Erosão e Progradação no Litoral Brasileiro** / Progr. de Geologia e Geofísica Marinha SECIRM. Dieter Muehe, org. 476 p. Brasília: MMA, 2006.
- ANGULO, R. J. **Geologia da planície costeira do Estado do Paraná**. São Paulo, 1992. 334 f. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. Ano 1992
- ARGENTO, M. S. F.; Mapeamento Geomorfológico. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B.; **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos**. 12 ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2013.
- ASSUMPÇÃO, A. P.; MARÇAL, M. S; Retificação dos Canais Fluviais e Mudanças Geomorfológicas na Planície Do Rio Macaé (RJ). **Revista de Geografia (UFPE)** V. 29, No. 3, 2012.
- AVTAR, R. YUNUS, A.P. KRAINES, S. YAMAMURO, M.; Evaluation of DEM generation based on Interferometric SAR using TanDEM-X data in Tokyo, Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, Volumes 83–84, 2015, Pages 166-177, ISSN 1474-7065, <https://doi.org/10.1016/j.pce.2015.07.007>.
- BEST, J. L.; On the interactions between turbulent flow structure, sediment transport and bedform development: some considerations from recent experimental research. **Unknown Journal**, 61-92. 1993. Disponível em: <https://experts.illinois.edu/en/publications/on-the-interactions-between-turbulent-flow-structure-sediment-tra>. Acesso em 30 de julho de 2020.
- BIGARELLA, J. J.; KLEIN, R. M.; LANGE, R. B.; LOYOLA e SILVA, J.; LARACH, J. O. I.; RAUEN, M. J. **A Serra do Mar e a porção oriental do estado do Paraná: um problema de segurança ambiental e nacional**. Secretaria de Estado do Planejamento – ADEA (Associação de Defesa e Educação Ambiental). Curitiba, 1978, 248 p.

BIGARELLA, J. J.; SUGUIO, K.; BECKER, R. D. **Ambiente Fluvial**: Ambientes de Sedimentação, sua interpretação e importância. 1ª. ed. Curitiba: Editora da Universidade Federal do Paraná. Associação de Defesa e Educação Ambiental, 1979.

BIGARELLA, J. J.; **Contribuição ao Estudo da Planície Litorânea do Estado do Paraná**. Brazilian Archives of Biology and Technology. Carta ao Dr. Loureiro Fernandes, julho de 1946. Arquivada no Museu Paranaense. Print version. ISSN 1516-8913. On-line version ISSN 1678-4324. Instituto de Biologia e Pesquisas Tecnológicas. Vol.jubilee Curitiba Dec. 2001.

BINDA, A. L.; FERNANDEZ, O. V. Q.; Morfologia de leito e processos erosivo-deposicionais em áreas afetadas por acumulações de detritos lenhosos: Rio Guabiroba, Guarapuava/PR. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.12, n.2, p.105-115, 2011.

BINDER, W. **Rios e Córregos, Preservar - Conservar – Renaturalizar**: A Recuperação de Rios, Possibilidades e Limites da Engenharia Ambiental. SEMADS: Rio de Janeiro, 2001.

BLUM, C. T.; **A Floresta Ombrófila Densa na Serra da Prata, Parque Nacional Saint-Hilaire/Lange**, PR – Caracterização Florística, Fitossociológica e Ambiental de um Gradiente Altitudinal.2006. 195 f. Dissertação (mestrado em Engenharia Florestal). Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná. 2006.

BLUM, C. T.; RODERJAN, C. V.; Espécies Indicadoras em um Gradiente da Floresta Ombrófila Densa na Serra da Prata, Paraná, Brasil. **Revista Brasileira de Biociências**, Porto Alegre, v. 5, supl. 2, p. 873-875, jul. 2007.

BOLAÑOS, S. G.; ROMÁN, A. Q.; ALVARADO, G. E. Low-cost UAV applications in dynamic tropical volcanic landforms, **Journal of Volcanology and Geothermal Research**, Volume 410, 2021, 107143, ISSN 0377-0273, <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2020.107143>.

BOTELHO, R. G. M. Bacias Hidrográficas Urbanas. In: Guerra, A. J. T. **Geomorfologia Urbana**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2011.

BOTELHO, R. G. M.; PELECH, A. S. Do Mapeamento Geomorfológico do IBGE a um Sistema Brasileiro de Classificação do Relevo. **Revista Brasileira de Geografia**., Rio de Janeiro, v. 64, n. 1, p. 183-201, jan./jun. 2019.

BOTREL, M. A.; NOVAES, L. P.; ALVIM, M. J. **Características forrageiras de algumas gramíneas tropicais**. Documento 66. EMBRAPA – Empresa brasileira de Pesquisa Agropecuária. Juiz de Fora – MG. Dezembro de 1998. 36 p. ISSN 0101-0581.

BRASIL. Decreto-Lei N. 8.847 - De 24 De Janeiro de 1946. **Diário Oficial da União** - Seção 1 - 28/1/1946, Página 1387 (Publicação Original). Rio de Janeiro, 24 de Janeiro de 1946.

BRICE, J. C.; **Channel Patterns and Terraces of the Loup Rivers in Nebraska**. U.S. Geol. Surv. Prof. Pap. 422-D. 1964.

BRIERLEY, G. FRYIRS, K. OUTHET, D. MASSEY, C. **Application of the River Styles framework as a basis for river management in New South Wales, Australia**. Applied Geography 22 (2002) 91–122.

BRIERLEY, G. FRYIRS, MARÇAL, M.; LIMA, R.; The use of ohe river styles framework as a tool to 'work with nature' in managing rivers in Brazil: examples from the Macaé catchment. **Revista Brasileira de Geomorfologia** (Online), São Paulo, v.20, n.4, (Out-Dez) p.751-771, 2019.

BRIERLEY, G. J.; FRYIRS, K. River Styles, a Geomorphic Approach to Catchment Characterization: Implications for River Rehabilitation in Bega Catchment, New South Wales, Australia. **Environmental Management**. V. 25. 661-679 (2000). <https://doi.org/10.1007/s002670010052>.

BROOKES, A. (1994). Geomorphology/Geology. In: GARDINER, J. L. (org.) **River Projects and Conservation**: A Manual for Hollistic Appraisal. John Wiley & Sons. Chichester. p. 57-66.

CAMPOS, E. H.; ALVES, R. R.; SERATO, D. S.; RODRIGUES, S. C. A Ocorrência de Feições Erosivas como Evidência da Evolução de Voçoroca em Uberlândia-MG. **Revista Brasileira de Geografia Física** Recife-PE. Vol.1 n.02 Set/Dez 2008,64-77.

CARBONNEAU, P. E., BIZZI, S., & MARCHETTI, G. (2018). Robotic photosieving from low-cost multirotor sUAS: A proof-of-concept. *Earth Surface Processes and Landforms*, 43, 1160–1166. <https://doi.org/10.1002/esp.4298>.

- CASSETI, V. **Ambiente e Apropriação do Relevo**. São Paulo: Contexto. 1991. 147 p.
- CASSETI, V. Cartografia Geomorfologia. *in*: _____. Geomorfologia. **Fundação de Apoio a Pesquisa–FUNAPE**, 2005. Disponível em: <https://observatoriogeogoiias.iesa.ufg.br/>. Acesso em: 30 julho de 2020.
- CASTRO, E. C.; O Problema da Escala. *In*: _____ GOMES, P. C. C.; CORRÊA, R. L.; Geografia Conceitos e Temas. 17ª ed. Rio de Janeiro; Bertrand Brasil, 2017.
- CHANDLER, B.M.P. LOVELL, H. BOSTON, .C.M. LUKAS, S. BARR, L. D. BENEDIKTSSON, I.O. BENN, D.I. CLARK, C.D. DARVILL, C.M. EVANS, D.J.A. EWERTOWSKI, M.W. LOIBL, D. MARGOLD, M. OTTO, J.C. ROBERTS, D.H. STOKES, C. R. STORRAR, R.D. STROEVEN, A.P. Glacial geomorphological mapping: A review of approaches and frameworks for best practice, *Earth-Science Reviews*, Volume 185, 2018, Pages 806-846, ISSN 0012-8252, <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.07.015>.
- CHISTOFOLETTI, A.; Aplicabilidade do conhecimento Geomorfológico nos Projetos de Planejamento. In GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B.; **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos**. 12 ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2013.
- CHISTOFOLETTI, A.; **Modelagem de Sistemas Ambientais**. 1ª ed – São Paulo: Editora Blucher, 1999.
- CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia fluvial**. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1981.
- CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1980
- COLLINS, M.J. & KNOX, J.C. (2003). Historical Changes in Upper Mississippi River Water Areas and Islands. In: **Journal of The American Water Resources Association**. p. 487-500
- CPRM. Carta de Geodiversidade da Folha Rio de Janeiro. Escala 1:1.000.000. **CPRM**, 2006. Disponível em: <http://geosgb.cprm.gov.br/>. Acesso em: 17 nov. 2017. (Carta de Geodiversidade do Brasil ao Milionésimo).
- CREPANI, E.; MEDEIROS, J. S.; HERNANDES FILHO, P.; FLORENZANO, T. G.; DUARTE, V.; BARBOSA, C. C. F. (2001) **Sensoriamento Remoto e geoprocessamento aplicados ao Zoneamento Ecológico-Econômico e ao ordenamento territorial**. São José dos Campos: INPE. 2001.
- CUNHA, S. B **Impactos das obras de engenharia sobre o ambiente biofísico da bacia do rio São João** (Rio de Janeiro – Brasil). Editora do Instituto de Geociências da UFRJ: Rio de Janeiro. Brasil. 378 páginas. 1994.
- CUNHA, S. B. da. Rios Desnaturalizados. In: BARBOSA, J. L.; LIMONAD, Ester (Org.). **Ordenamento Territorial e Ambiental**. Niterói: EDUFF, 2012. Cap. 8. p. 171-191.
- CUNHA, S. B. Geomorfologia Fluvial. In GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B.; **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos**. 12 ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2013.
- CUNHA, S. B. Geomorfologia Fluvial. In: CUNHA, S. B. e GUERRA, A. J. T. (Orgs); **Geomorfologia: Exercícios, Técnicas e Aplicações**. 3ª ed. Rio de Janeiro, ed. Bertrand Brasil, 2009.
- CURCIO, G. R.; RACHWAL, M. F. G.; WISNIEWSKI, C.; TIEPOLO, G. Desmatamento de margens de rios: a situação do Rio Cachoeira. *In*: LIMA, R. E.; NEGRELLE (orgs.). **Meio Ambiente e Desenvolvimento no Litoral do Paraná: Diagnóstico**. Curitiba: Editora da UFPR; Brasília: CNPq. 1998. p. 77-81.
- DECEA. Departamento de Controle do Espaço Aéreo. **Orientações para o uso de Drones**. 2019. Disponível em: <https://www.decea.gov.br/drone/>. Acesso em: 30 de julho de 2019
- DIETRICH, J.T.; Bathymetric Structure-from-Motion: extracting shallow stream bathymetry from multi-view stereo photogrammetry. *EARTH SURFACE PROCESSES AND LANDFORMS* Earth Surf. Process. Landforms 42, 355–364 (2017) Copyright © 2016 John Wiley & Sons, Ltd. Published online 9 November 2016 in Wiley Online Library. DOI:10.1002/esp.4060

DIETRICH, J.T.; Riverscape mapping with helicopter-based Structure-from-Motion photogrammetry, *Geomorphology*, Volume 252, 2016, Pages 144-157, ISSN 0169-555X, <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.05.008>.

DSG - Diretoria de Serviço Geográfico. Norma da Especificação Técnica para Controle de Qualidade de Dados Geoespaciais (ET-CQDG). 2016.

EVANS, I. S.; HENGL, T.; GORSEVSKI, P. Applications in Geomorphology. In: HENGL, T.; REUTER, H. I. (eds.) *Geomorphometry - Concepts, Software, Applications, Series Developments in Soil Science* vol. 33, Amsterdam: Elsevier, pp. 497-526, 2009.

FERGUSON, Robert I. **Hydraulics and hydraulic geometry**. *Progress in Physical Geography*, v.10, p.1-31, 1986.

FERNANDEZ, O. V. Q.; REBELATTO, G. E.; SANDER, C. Análise Quantitativa de Seções Transversais em Canais Fluviais. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.2, n.1, p. 85-92, 2001.

FRIEDENREICH, G. & PINHEIRO, A. (2002). Transformações Geomorfológicas e Fluviais Decorrentes da Canalização do Rio Itajaí-Açu na Divisa dos Municípios de Blumenau e Gaspar (SC). **Revista Brasileira de Geomorfologia**, Ano 3, nº 1, p. 1-9.

GOUDARD e PAULA, 2016. O Clima do Litoral Paranaense: variabilidades, mudanças climáticas, tendências e desafios. In: BOLDRINI, E. B.; PAES, L. S. O. P; PINHEIRO, F. **Clima: Boas Práticas de Adaptação** - 1. Ed. Antonina-PR. ADEMADAN. 2016.

GREGORY, K. J.; **A natureza da Geografia Física**. Ed. Bertrand Brasil. Rio de Janeiro. – RJ. Ano 1985. 368 p.

GREGORY, K. J.; PARK, C. Adjustment of River Channel Capacity Downstream From a Reservoir. **Water Resources Research**, v. 10, p. 870-873, 1974.

GRISON, F. KOBAYAMA, M. Teoria e Aplicação da Geometria Hidráulica: Revisão. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.12, n.2, p.25-38, 2011.

GUERRA, A. T. Dicionário Geológico Geomorfológico. 8ª ed. 464 p. IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Rio de Janeiro. 1993.

HAAS, T., NIJLAND, W., JONG, S.M. MCARDILL, B.W.; How memory effects, check dams, and channel geometry control erosion and deposition by debris flows. *Sci Rep* 10, 14024 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-71016-8>

HAMSHAW, S. D., BRYCE, T., RIZZO, D. M., O'NEIL-DUNNE, J., FROLIK, J., & DEWOOLKAR, M. M. (2017). Quantifying streambank movement and topography using unmanned aircraft system photogrammetry with comparison to terrestrial laser scanning. *River Research and Applications*, 33(8), 1354–1367.

HENGL, T. EVANS, I.S.; Chapter 2 Mathematical and Digital Models of the Land Surface, Editor(s): Tomislav Hengl, Hannes I. Reuter, *Developments in Soil Science*, Elsevier, Volume 33, 2009, Pages 31-63, ISSN 0166-2481, ISBN 9780123743459, [https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(08\)00002-0](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(08)00002-0).

HERVOUET, A., DUNFORD, R., PIÉGAY, H., BELLETTI, B. & TREMELO, M-L Analysis of post flood recruitment patterns in braided-channel rivers at multiple scales based on an image series collected by unmanned aerial vehicles, ultra-light aerial vehicles, and satellites. **GIScience & Remote Sensing**, v. 48, n. 1, p. 50732011.

HUGENHOLTZ, C. H.; WHITEHEAD, K.; BROWN, O. W.; BARCHYN, T. E.; MOORMAN, B. J.; LECLAIR, A.; RIDDELL, K.; HAMILTON, T. Geomorphological mapping with a small unmanned aircraft system (sUAS): Feature detection and accuracy assessment of a photogrammetrically-derived digital terrain model. **Geomorphology**, v. 194, p.16-24, 2013.

HUNG. M. N. W.; SAMPAIO, T. V. M.; SCHULTZ, G. B.; SIEFERT, C. A. C.; LANGE, D. R. MARAGON, F. H. S. SANTOS, I. Levantamento com veículo aéreo não tripulado para geração de modelo digital do terreno em bacia experimental com vegetação florestal esparsa. **Revista Ra'e Ga**. Curitiba, V.43 p. 215 -231, ISSN: 2177-2738. Fev/2018.

IBGE, 2007. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. Manual Técnico de Pedologia. Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. 2ª ed. IBGE. Rio de Janeiro, 2007. 316 p.

IBGE, 2017. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. Manual do Usuário, Aplicativo Online IBGE-PPP Versão: abril 2017. Rio de Janeiro. 2017. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101677.pdf>. Acesso em 30 de jul de 2020.

IBGE, 2018. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. Desbravar, conhecer, mapear: memórias do Projeto Radam / RadamBrasil / IBGE, Gerência de Biblioteca e Acervos Especiais. - Rio de Janeiro: IBGE, 2018. 364 p. - (Documentos para disseminação. Memória institucional, ISSN 0103-6459 ;24)

INCRA, 2013. Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária. **Manual Técnico de Limites e Confrontações**: georreferenciamento de imóveis rurais. Coordenação Geral de Cartografia. Brasília, 2013. 27p.

ITCG. **Instituto de Terras, Cartografia e Geologia do Paraná**. Carta da Vegetação da Serra do Mar e Planície Litorânea do Paraná, Folha 2858-2 NO, Escala: 1:50.000. Ano. 2009. Disponível em: <http://www.itcg.pr.gov.br/>. Acesso em: 30 de jul de 2020.

JULIEN, P. Y; **Erosion and sedimentation**. Cambridge University Press. New York - USA. Ano 1994. 390 páginas.

JUNIOR, A. P. M., BARROS, L. F. P.; **Hidrogeomorfologia**: Formas, processos e registros sedimentares fluviais. 1ª Ed. Bertrand Brasil, 417 páginas. Ano 2020.

KLEINA, M.; PAULA, E. V.; SANTOS, L. J. C.; Análise Comparativa dos Estilos Fluviais do Rio Sagrado (Morretes/PP) para os anos de 2006 e 2011. **Revista Geografar** - Curitiba, v.9, n.1, p.27-44, jun./2014.

KLIMASZEWSKI, M. Problems of Geomorphological Mapping. Geographical Studies n. 46. **Institute of Geography of the Polish Academy of Sciences**. Poland, 12 May, 1962. Disponível em: <http://www.rcin.org.pl/>. Acesso em 30 de jul. de 2020.

KNIGHTON, D. **Fluvial forms and process**. London: E. Arnold, 1984. 218 p.

KOHLER, H. C.; A Escala na Análise Geomorfológica. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, Ano 3, Nº 1. 11-19. 2002.

LENCIONI, S; Aroldo de Azevedo: um Geógrafo da Universidade de São Paulo. **Boletim Paulista de Geografia**, São Paulo, nº 92, 2012.

LEOPOLD, L. B.; MADDOCK, T. The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications. **United States Geological Survey**, Prof. Paper. 252, 56p, 1953. Disponível em: <https://pubs.er.usgs.gov/publication/pp252>. Último acesso: 10 de nov. de 2019.

LEOPOLD, L.B. & WOLMAN, M.G. (1957) River patterns, braided, meandering and straight. U.S. Geological Survey Professional Paper, 282-B:1-85.

LEOPOLD, L.B. **A view of the river**. 4th. ed. Cambridge: Harvard University Press, 1996.

LIMA, R. N. S.; MARÇAL, M. S.; Avaliação da Condição Geomorfológica da Bacia do Rio Macaé—RJ a Partir da Metodologia de Classificação dos Estilos Fluviais. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.14, n.2, (Abr-Jun) p.171-179, 2013.

LOVI, E; **Geomorphological Assessment of the Sedimentary Dynamics of the Sunday River, Quebec**. A Tese (Doutorado em Geografia). The Department of Geography, Planning and Environmental. Concordia University, Montreal, Quebec, Canadá. Setembro 2012. 135 páginas.

LUZ, L. M.; MARÇAL, M. S.; A Perspectiva Geográfica do Antropoceno. **Revista de Geografia (Recife)** V. 33, No. 2, 2016. ISSN 0104-5490.

MAACK, R. **Geografia Física do Estado do Paraná**. 4. ed. Ponta Grossa: Editora UEP, 2012.

MANCINI, F.; DUBBINI, M.; GATTELLI, M.; STECCHI, F.; FABBRI, S.; GABBIANELLI, G.; Using Unmanned Aerial Vehicles (UAV) for High-Resolution Reconstruction of Topography: The Structure from Motion Approach on Coastal Environments. **Journal Remote Sensing**. ISSN

2072-4292. 2013, 5, 6880-6898; doi:10.3390/rs5126880. Disponível em: www.mdpi.com/journal/remotesensing. Acesso em: 30 de jul. 2020.

MARÇAL, M. S. Análise das Mudanças Morfológicas em Seções Transversais ao Rio Macaé/RJ. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.14, n.1, (Jan-Mar) p.59-68, 2013.

MAROTTA, G. S.; CICERELLI, R. E.; FERREIRA, A. M. R.; ROIG, H. L.; ABREU, M. A.; Avaliação Posicional De Modelo Digital De Superfície Derivado De Câmara De Pequeno Formato. **Revista Brasileira de Cartografia**. V. 67/7: p. 1467 – 1477. ISSN: 1808-0936. 2015.

MARQUES, J. S. Ciência Geomorfológica. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. **Geomorfologia: Uma atualização de bases e conceitos**. 3º ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1998.

MARTINS, D. P.; STEVAUX, J. C.; Formas de Leito e Transporte de Carga de Fundo do Alto Rio Paraná. **Revista Brasileira de Geomorfologia** - Ano 6, nº 2 (2005) 43-50.

MMA. Ministério do Meio Ambiente. **Shapefile das Áreas Prioritárias para Conservação**. Brasília. 2007.

MMA. Ministério do Meio Ambiente. **Shapefile das Unidades de Conservação**. Brasília. 2020.

MORISAWA, M. Rivers: Form and Process. Harlow: Longman, 1985. 222p. **Physical Geography**, v. 10, p. 1-31, 1986.

MUEHE, D. **(Org)Erosão e progradação no litoral brasileiro** / Programa de Geologia e Geofísica Marinha SECIRM. _____, organizador. 476 p. – Brasília: MMA, 2006.

ODRESKI, L. L. R.; SOARES, C. R.; ANGULO, R. J.; ZEM, R. C. Taxas de Assoreamento e a Influência Antrópica no Controle da Sedimentação da Baía de Antonina (Antonina/PR). **Boletim Paranaense de Geociências**, Editora UFPR, n. 53, p. 7-12, 2003.

OKA-FIORI; SANTOS, L.J.C.; CANALI, N. E.; FIORI, A.P.; SILVEIRA, C.T.; SILVA, J.M.F.; ROSS, J.L.S. **Atlas Geomorfológico do Estado do Paraná**: escala base 1:250.000, modelos reduzidos 1:500.000. Minerais do Paraná – MINEROPAR, Curitiba, 59 p. Ano: 2006

OLIVEIRA D. R.; CICERELLI, R. E.; ALMEIRA, T.; MAROTTA, G, S.; Geração de Modelo Digital do Terreno a Partir de Imagens Obtidas por Veículo Aéreo não Tripulado. **Revista Brasileira de Cartografia**. V. 69/6: p. 1143 - 1151. ISSN: 1808-0936. 2017.

OLIVEIRA, E. D.; Geometria Hidráulica: Algumas Considerações Teóricas e Práticas. **Revista Sociedade e Território**, Natal, v. 24, nº 1, p. 166 - 184, jan./jun. 2012.

OLSON-RUTZ, K. L.; MARLOW, C. B. Analysis and interpretation of stream channel cross-sectional data. **North American Journal of Fisheries Management**, United States, v.1, n. 12, p. 55-61. 1992.

PARANÁ; Instituto das Águas do Paraná. Departamento Técnico de Saneamento. **Mapa do Projeto de Desassoreamento dos rios Jacaré e Piraquara**. Curitiba: PR. DTS. 2017. Escala: 1:7.500.

PARANAGUA SANEAMENTO. **Relatório Anual de qualidade da água**. Paranaguá, 2017.

PARANAGUÁ. Prefeitura. **Plano Mun. de Saneamento Básico de Paranaguá/PR**. Paranaguá, 2011.

PAULA, E. V. **Análise da Produção de Sedimentos na Área de Drenagem da Baía de Antonina/PR**: Uma abordagem Geopedológica. 2010. 155 f. Tese (Doutorado em Geografia) - Curso de Geografia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

PAULA, E. V. **Análise da Produção de Sedimentos na Área de Drenagem da Baía de Antonina, Paraná**: Contribuições ao planejamento do território. In: Rodrigo Arantes Reis; Cinthia Maria de Sena Abrahão; Liliani Marília Tiepolo; Marcelo Chemin. (Org.). Litoral do Paraná: Território e Perspectivas. VOLUME 1 Sociedade, Ambiente e Gestão. 1ed.Curitiba: Brazil Publishing, 2016, v. 1, p. 11-35.

PAULA, E. V.; CUNICO, C.; BOLDRINI, E. B. Controle do assoreamento e dos contaminantes por meio da gestão de bacias hidrográficas para o planejamento das dragagens portuárias na Baía de Antonina/Paraná/Brasil. **RAE´GA**. Curitiba, n.12. 2006. p.195-210.

PAULA, E. V.; SANTOS, L. J. C.; UBER, J. A.; Análise da Suscetibilidade Geopedológica à Produção de Sedimentos na Área de Drenagem da Baía de Antonina/Pr. **Revista de Geografia**. Recife: UFPE – DCG/NAPA, v. especial VIII SINAGEO, n. 2, Set. 2010.

PDS. (2019). **Plano de Desenvolvimento Sustentável do Litoral do Paraná**. Produto 10, - Relatório do plano de ação inicial. Volume 2. Maio de 2019. 525 páginas.

PELECH, A. S.; NUNES, B. T. A.; GATTO, L. C. S.; BOTELHO, R. G. M. Considerações Sobre o Mapeamento Geomorfológico do Território Brasileiro: Algumas Abordagens na Representação Regional. **Revista Brasileira de Geomorfologia**. (Online), São Paulo, v.20, n.3, (Jul-Set) p.681-690, 2019

PELOGGIA, A.U.G. **O homem e o ambiente geológico**: geologia, sociedade e ocupação urbana no município de São Paulo. São Paulo: Xamã, 1998, 271p.

PIÉGAY, H., KONDOLF, G. M., MINEAR, J. T., VAUDOR, L.; Trends in publications in fluvial geomorphology over two decades: A truly new era in the discipline owing to recent technological revolution? 2015. *Geomorphology* Volume 248, 2015, Pages 489-500, ISSN 0169-555X, <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.07.039>.

PUTTOCK, A.K. CUNLIFFE, A.M. ANDERSON, K. BRAZIER, R.E.; Aerial photography collected with a multirotor drone reveals impact of Eurasian beaver reintroduction on ecosystem structure. *J. Unmanned Veh. Syst.* 3: 1–8 (2015) <https://dx.doi.org/10.1139/juvs-2015-0005>

RICCOMINI, C.; COIMBRA, A. M.; Sedimentação em rios entrelaçados e anastomosados. **Boletim IG**, USP. N.6, p. 1-45. 1993.

RICCOMINI, C.; GIANNINI, P. C. F.; MANCINI, F. Rios e processos aluviais. In: TEIXEIRA, W.; TOLEDO, M. C. M.; FAIRCHILD, T. R.; TAIOLI, F. (Orgs). **Decifrando a Terra**. 2ª ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. 568 p.

ROSS, J. L. S. O registro cartográfico dos fatos geomórficos e a questão da taxonomia do relevo. São Paulo. **Revista do Departamento de Geografia** (USP), n. 6, p. 17-29, 1992.

ROSS, J. L. S.; Relevo Brasileiro: Uma Nova Proposta de Classificação. **Revista Do Departamento de Geografia** (USP), n. 4, p. 25-39, 1985. Doi: <https://doi.org/10.7154/RDG.1985.0004.0004>.

RUSNÁK, M. SLÁDEK, J. KIDOVÁ, A. LEHOTSKÝ, M.; Template for high-resolution river landscape mapping using UAV technology, *Measurement*, Volume 115, 2018, Pages 139-151, ISSN 0263-2241, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.10.023>.

RUTHERFURD, I. D. Some human impacts on Australian stream channel morphology. In **River Management: The Australasian Experience**, Brizga S, Finlayson B (eds). Published: John Wiley & Sons: Chichester; 11–49. 2000.

RUTYNA, B. B.; SOARES, C. R.; WROBLEWSKI, C. A.; PAULA, E. V. Assoreamento nas baías de Antonina e de Paranaguá - PR: Análise integrada das áreas fontes de sedimentação e obras de dragagem. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, p. 676, 2021.

SALGADO, A. A. R.; BIAZINI, J.; HENNING, S.; Geomorfologia Brasileira: Panorama Geral da Produção Nacional no Início do Século XXI (2001-2005). Nota Técnica: **Revista Brasileira de Geomorfologia** - Ano 9, nº 1 (2008).

SAMPAIO, T. V. M.; BRANDALIZE, M. C. B.; Cartografia geral, digital e temática. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, 2018. 210 p.; Série Geotecnologias: teoria e prática; v. 1.

SANTOS, M. L.; FERNANDEZ, O. V. Q.; STEVAUX, J. C. Aspectos Morfogenéticos das Barras de Canal do Rio Paraná, trecho de Porto Rico, PR. **Boletim de Geografia** – Universidade Estadual de Maringá. N1. P. 11-24. Ano 1992.

SANTOS, R. F. **Planejamento Ambiental**: Teoria e Prática. Ed, Oficina de Textos. 2009. 184 p.

SCHUM, S. A.; Patterns of Alluvial Rivers. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* Department of Earth Resources, Colorado State University, Fort Collins. 1985.13:5-27.

SCHUMM, S. A. Evolution and response of the fluvial system, sedimentologic implications. *Soc. Econ. Paleontol. Mineral. Spec. Publ.* 3 1: 19-29. 1981.

SHEN, H. W.; SCHUMM, S. A.; NELSON, J. D.; DOEHRING, D. O.; SKINNER, M. M.; **Methods for Assessment of Stream-Related Hazards to Highways and Bridges**. Colorado State University, Fort Collins, DC United States. Disponível em: <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/25315>. Acesso em 30 de jul. de 2020.

SIEBERT, S.; TEIZER, J. Mobile 3D mapping for surveying earthwork projects using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) system. **Automation in Construction**, v. 41, p. 1-14, 2014.

SIGMINE, 2021. Sistema de Informação Geográfica de Mineração. Agência Nacional de Mineração – ANM (Brasil). Rio Jacareí, Paranaguá e Morretes, Paraná. Disponível em: <https://geo.anm.gov.br>. Acesso em: 11 de setembro de 2021.

SILVA, J. M. F.; OKA-FIORI, C.; SILVEIRA, C. T.; Geomorfometria: uma análise de conceitos, métodos e aplicações em geografia física. **Revista Brasileira de Geografia Física**. v.10, n.2. p. 558-583. 2017.

SILVA, J. M. F.; SANTOS, L. J. C.; Caracterização e Cartografia em Escala de Detalhe das Feições Fluviais Derivadas do Rio Pequeno, Antonina-Pr. **Revista Ra'e Ga**. Curitiba. v.34, p. 150-166. Ago. de 2015.

SILVA, J. M. F. **Caracterização e Mapeamento das Unidades Geomorfológicas da Bacia do Rio Pequeno, Antonina-Pr**. 2010. 114 páginas. Dissertação (Mestrado em Geografia). Departamento de Geografia. Universidade Federal do Paraná. Curitiba-PR, 2010.

SILVEIRA, C. T.; FIORI, A. P.; SCHILIPACK, P. DIAS, S. M.; Mapeamento Preliminar Da Suscetibilidade Natural a Movimentos de Massa da Serra do Mar Paranaense Apoiado Na Análise Digital do Relevo. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, São Paulo, v.15, n.1, (Jan-Mar) p.3-22, 2014.

SILVEIRA, C.T.; Classificação do Relevo no Brasil: demandas, desafios, ações e proposições. **Segunda-Feira com Geomorfologia**. Canal do Youtube da União da Geomorfologia Brasileira. 29 de jun. 2020. Apresentações e debates on-line de especialistas na área. Disponível em <https://www.youtube.com/watch?v=lejD6r9jHPU>. Acesso em 30 de jul. de 2020.

SILVEIRA, C.T.; FIORI, A. P.; FERRIRA, A. M.; FELIPE, R. S.; FILHO, J. L. K.; FOLADOR, R. M.; COSTA, L. C. Análise do Fator de Segurança da Estabilidade das Vertentes na Bacia do Rio Jacareí, Serra Do Mar Paranaense. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.13, n.3, (Jul-Set) p.287-297, 2012.

SILVEIRA, C.T.; FIORI, A. P.; FERRIRA, A. M.; GÓIS, J. R.; MIO, G.; SILVEIRA, M. P.; MASSULINI, N. E. B.; LEONARDI, T. M. H. Emprego de Atributos Topográficos no Mapeamento da Suscetibilidade a Processos Geoambientais na Bacia do Rio Jacareí. **Revista Sociedade & Natureza**. Versão On-line ISSN 1982-4513. Vol.25 no.3 Uberlândia set./dez. 2013. <https://doi.org/10.1590/S1982-45132013000300014>.

ŚLEDŹ, S. EWERTOWSKI, M.W. PIEKARCZYK, J.; Applications of unmanned aerial vehicle (UAV) surveys and Structure from Motion photogrammetry in glacial and periglacial geomorphology, **Geomorphology**, Volume 378, 2021, 107620, ISSN 0169-555X, <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.107620>.

SIMEPAR, 2021. Sistema de Tecnologia e Monitoramento Ambiental do Paraná. Boletins Climáticos. Disponível em: <http://www.simepar.br/>. Acesso em: 26 de setembro de 2021.

SMITH, M.P.; SCHIFF, R.; OLIVERO, A.; MACBROOM, J. **The Active River Area: A Conservation Framework for Protecting Rivers and Streams**. Boston: The Nature Conservancy, 2008.

SMITH, N. D.; Sedimentology and bar formation in the Upper Kicking Horse River, a Braided outwash stream. **Journal of Geology**. N. 82, p. 205-224, 1974.

SOTCHAVA, V. B. Estudo de Geossistemas. Métodos em Questão nº 16. São Paulo: **Revista IG**, USP, 1977.

STEFFEN, W.; CRUTZEN, P.J.; MCNEILL, J.R. The Anthropocene are humans now overwhelming the great forces of nature. **AMBIO: A Journal of the Human Environment**, vol.36, n.8, p. 614-621, Out 2007

STEVAUX, J. C.; LATRUBESSE, E. M.; **Geomorfologia Fluvial**. Oficina de Textos. São Paulo. 2017. (Coleção Geografia; v. 3. Org: Francisco Assis Mendonça).

SUGUIO, K. **Geologia Sedimentar**. Editora: Edgard Blucher. Ano: 2003. 305 p.

SUGUIO, K. **Introdução à Sedimentologia**. São Paulo. Edgard Blücher. 1973. 307p.

SUGUIO, K.; BIGARELLA, J. J. **Ambiente Fluvial**. Curitiba: Editora Universidade Federal do Paraná; ADEA, 1979.

TUCCI, C. E.M; Gestão de Águas Pluviais Urbanas/ Carlos E. M. Tucci. Ministério das Cidades. **Global Water Partnership - Wolrd Bank – Unesco** 2005. 192 páginas.

VANHONI, F; MENDONÇA, F. O clima do litoral do estado do Paraná. **Revista Brasileira de Climatologia**. Curitiba, n.3. p.49-63, 2008.

VIEIRA, V. T.; CUNHA, S. B.; Mudanças Na Morfologia dos Canais Urbanos: Alto Curso do Rio Paquequer, Teresópolis – RJ (1997/98 – 2001). **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.9, n.1, p.3-22, 2008.

VILES, H.; Technology and geomorphology: Are improvements in data collection techniques transforming geomorphic science? **Geomorphology**, Volume 270, 2016, Pages 121-133, ISSN 0169-555X, <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.07.011>.

WILLIAMS, P. B.; ORR, M. K.; GARRITY, N. J. Hydraulic Geometry: A Geomorphic Design Tool for Tidal Marsh Channel Evolution in Wetland Restoration Projects. *Restoration Ecology*, v. 10, n. 3, p. 577-590, 2002.

WIZGA, B. (2001). A Geomorphologist's Criticism of the Engineering Approach to Channelization of Gravel-Bed Rivers: Case Study of the Raba River, **Polish Carpathians Environmental Management**. v 28, n°3, p. 341-358.

WOLMAN, M. G.; e LEOPOLD, L. B.; **River flood plains**: some observations on their formation. United States Geological Survey, Prof. Paper, 1957.

WOLMAN, M.G. AND MILLER, J.P. Magnitude and Frequency of Forces in Geomorphic Process. **Journal of Geology**, 68, 54-74. 1960. Disponível em: http://geomorphology.sese.asu.edu/Papers/Wolman_and_Miller_1960.pdf. Último acesso: 30 de jul. de 2020.

ZANETTI, J.; JUNIOR, J. G.; SANTOS, A. P. Influência do número e distribuição de pontos de controle em ortofotos geradas a partir de um levantamento por vant. **Revista Brasileira de Cartografia**, V 69/2: p. 263-277. ISSN: 1808-0936. 2017.

ZHANG, X. ZHANG, F. QI, X. DENG, L. WANG, X. YANG, S. New research methods for vegetation information extraction based on visible light remote sensing images from an unmanned aerial vehicle (UAV), **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, Volume 78, 2019, Pages 215-226, ISSN 0303-2434, <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.01.001>.

ANEXO

Desassoreamento dos rios Jacareí e Piraquara - 2017, INSTITUTO DAS ÁGUAS DO PARANÁ

