



# Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbge>



## Cartografia Geomorfológica em Imagens de Altíssima Resolução: Uma proposta para sistemas erosivos lineares

Cenira Maria Lupinacci<sup>1</sup>, Estêvão Botura Stefanuto<sup>2</sup>, Danilo Marques de Magalhães<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Professora Titular no Departamento de Geografia e Planejamento Ambiental – DGPA/IGCE da UNESP Campus de Rio Claro. Avenida 24 A,1515 - Rio Claro/SP - CEP 13506-900. [cenira.lupinacci@unesp.br](mailto:cenira.lupinacci@unesp.br) <sup>2</sup> Pós-doutorando no Departamento de Geografia – DGEO/IG da UNICAMP. Rua Carlos Gomes, 250 - CEP: 13083-855 - Campinas, SP. [ebs@unicamp.br](mailto:ebs@unicamp.br) (autor correspondente) <sup>3</sup> Professor Assistente Doutor no Departamento de Geografia e Planejamento Ambiental – DGPA/IGCE da UNESP Campus de Rio Claro. Avenida 24 A,1515 - Rio Claro/SP - CEP 13506-900. [daniilo.magalhaes@unesp.br](mailto:daniilo.magalhaes@unesp.br)

Artigo recebido em 12/09/2024 e aceito em 03/11/2024

### RESUMO

A erosão linear acelerada constitui-se em fenômeno registrado e estudado com frequência na bibliografia nacional e internacional. Assim, o objetivo deste artigo é discutir as possibilidades da criação de mapeamentos geomorfológicos que permitam o monitoramento e subsidiem o manejo de sistemas erosivos lineares, a partir do uso de imagens de altíssima resolução, obtidas através de veículos aéreos não tripulados (VANTs). Parte-se da hipótese que o mapeamento geomorfológico, ao espacializar as diversas feições oriundas dos sistemas erosivos lineares, pode colaborar com indicativos dos setores mais ativos e, a partir disso, auxiliar no direcionamento das ações de manejo e contenção das feições erosivas lineares. O mapeamento elaborado possibilitou identificar feições detalhadas do sistema erosivo, permitindo avaliar a dinâmica e identificar setores mais ativos. Ainda, são apresentados procedimentos e simbologias que podem ser replicados para mapeamentos geomorfológicos utilizando imagens de altíssima resolução.

Palavras-chave: Voçoroca; Ravinas, Simbologia.

## Geomorphological Cartography in Very High-Resolution Images: A proposal for linear erosion systems

### ABSTRACT

Accelerated linear erosion is a phenomenon frequently identified and studied in national and international literature. The aim of this paper is to discuss the possibilities of creating geomorphological mappings that enable the monitoring and support the management of linear erosion systems, based on the use of very high-resolution images, obtained with the use of unmanned aerial vehicles (UAVs). The working hypothesis is that geomorphological mapping, by spatializing the various linear erosive features, can collaborate with the identification of the most active sectors and assist in the management and containment of linear erosive features. The mapping made it possible to identify detailed features of the erosion system, allowing its dynamics to be evaluated and to identify more active sectors. Procedures and symbols are presented that can be replicated for geomorphological mapping using very high-resolution images.

Keywords: Gully, Ravines, Symbolology.

## Introdução

A erosão constitui-se em fenômeno registrado e estudado com frequência na bibliografia nacional e internacional. Este fenômeno compromete a produtividade agrícola ao exaurir a fertilidades dos solos, assim como, por processos de assoreamento, a disponibilidade água nos cursos fluviais. Autores brasileiros e de todo mundo têm apontado para a multiplicidade de causas da erosão dos terrenos agrícolas (Tebebu et al., 2010; Bezerra et al., 2020; Dalzell et al., 2022; Facadio et al. 2023; Pañuela et al., 2023). García-Ruiz et. al (2013) afirmaram que a erosão do solo se tornou um dos mais significativos problemas ambientais, sendo o foco de diversas pesquisas na Espanha, Itália, França, Portugal, Israel, Grécia e Norte de África e que as causas destes problemas são bastante variadas, enfatizando a influência dos diversos padrões de uso da terra. Na China, diversos autores, como Chu et al. (2019) e Li et al. (2019), tem voltado sua atenção para estudos da influência do plantio do eucalipto e de pastagens nos processos erosivos. Interessante destacar a atenção dos autores chineses para a questão do manejo de tais culturas e sua interferência sobre os processos erosivos.

Os padrões de uso da terra, portanto, são considerados como fator decisivo no desencadeamento dos processos erosivos, inclusive no que se refere aos tipos de erosão. Assim, dentre os diversos tipos de processos erosivos, constata-se uma atenção maior aqueles de caráter linear, os quais dão origem, em estágio mais avançado, às voçorocas. Ainda a relação erosão linear e a manutenção dos recursos hídricos fluviais também tem sido apontada. Poesen et al. (2003) destacam a importância do estudo de feições erosivas lineares para se compreender a dinâmica de sedimentos em bacias hidrográficas. Os autores afirmam que, em pequenas bacias, os fatores principais que influenciam tais feições são a topografia, o tipo de solo, as condições climáticas, o uso da terra e o próprio tipo de feição. Vanmaercke et al. (2016), em ampla revisão sobre as taxas de evolução de voçorocas no mundo, afirmam que a área de contribuição, assim como as variações nas chuvas diárias, constitui-se em fatores importantes para a compreensão da evolução dessas formas. Destacam que as mudanças climáticas podem então ter interferência significativa em futuras taxas de evolução. Frankl et al. (2011), utilizando fotografias aéreas de diversos períodos, estudam

voçorocas ao longo de 140 anos, estabelecendo um modelo evolutivo dessas para a região norte da Etiópia. Dessa pesquisa, Frankl et al. (2012) enfatizam questões importantes sobre as diferenças nas taxas evolutivas em longo e curto prazo. Para os autores, a partir da experiência no norte da Etiópia, em longo prazo, a área de contribuição é um parâmetro bastante significativo. Nesse estudo ainda apontam o processo de *piping* como aspecto importante na explicação da evolução dos taludes erosivos.

Nos diversos estudos sobre voçorocas, verifica-se uma busca constante por técnicas de análise que possam gerar bancos de dados robustos que subsidiem o monitoramento e o manejo destas feições. Para isso, tradicionalmente, considera-se imprescindível o monitoramento da evolução das feições em campo, principalmente a partir de experimentos (Guerra, 2002). Este tipo de dado demanda esforços e recursos financeiros os quais nem sempre estão disponíveis. Além disso, estão sujeitos a condições climáticas excepcionais, que restringem a validade dos dados, ou outras intercorrências, como destruição dos experimentos por animais, pelas comunidades vizinhas ou ainda por processos evolutivos mais acelerados do que foi previsto inicialmente, quando da instalação do próprio experimento.

Assim, o uso de imagens de altíssima resolução tem sido apontado por diversos autores como um caminho para o estudo das feições erosivas lineares, principalmente de voçorocas no Brasil. Julian e Nunes (2020) calculam o volume de solo erodido a partir do processamento de imagens obtidas por VANT. Já Vieira, Lima e Silva (2023), além de calcular o volume, ainda realizam uma estimativa dos custos para a contenção das diversas incisões analisadas. Loureiro, Guerra e Andrade (2020) realizaram um estudo experimental combinando dados de Laser Scanner Terrestre e os produzidos por VANT que demonstra o potencial da associação de dados quantitativos (Laser) aos qualitativos (VANT). Rademan e Trentin (2020) utilizam imagens produzidas por meio do uso de VANT para calcular uma série de parâmetros morfométricos em voçorocas, visando avaliar distintas dinâmicas existentes neste tipo de feição linear. Viera e Frola Filho (2023) utilizaram imagens produzidas por VANT, junto com outros procedimentos, para monitorar a evolução de voçorocas e recomendam a união de diversas técnicas para maior precisão dos dados, incluindo as medidas de campo.

Considerando estes estudos, o objetivo deste artigo é discutir as possibilidades da criação de mapeamentos geomorfológicos que permitam o monitoramento e subsidiem o manejo de sistemas erosivos lineares, a partir do uso de imagens de altíssima resolução, obtidas com o uso de veículos aéreos não tripulados (VANTs). Tais mapeamentos consideraram os princípios da cartografia geomorfológica colocados por Gustavsson, Seijmonsbergen e Kolstrup (2008), que propõem o entendimento do mapa geomorfológico como um banco de dados.

Parte-se da hipótese que o mapeamento geomorfológico utilizando imagens de altíssima resolução, ao espacializar as diversas feições oriundas dos sistemas erosivos lineares, pode colaborar com indicativos dos setores mais ativos e, a partir disso, auxiliar no direcionamento das ações de manejo e contenção das ações erosivas lineares. Conforme apontam Vieira e Frota Filho (2023) o monitoramento da evolução dos taludes necessita da união de diversas técnicas, incluindo as de campo, de alto custo. Assim, considera-se que a cartografia geomorfológica, ao mapear os indícios de possível evolução dos taludes (como blocos solapados, alcovas de regressão, ravinas e sulcos erosivos) pode indicar prováveis setores mais ativos, independentemente do monitoramento do talude erosivo.

## Material e métodos

### Área de Estudo

A área de estudo localiza-se no município de Corumbataí (SP), posicionando-se no setor leste da Bacia Sedimentar do Paraná, na província da Depressão Periférica Paulista, na Zona do Médio Tietê (Figura 1). Regionalmente, esta zona caracteriza-se pela presença de rochas sedimentares, com expressivas intrusões de rochas basálticas. A morfologia dominante, segundo IPT (1981a), é de Morrotes, os quais apresentam interflúvios sem orientação preferencial, topos angulosos e achatados e vertentes ravinadas com perfis retilíneos. A drenagem apresenta média a alta densidade, padrão dendrítico e vales fechados (IPT, 1981a, p.58).

A área de estudo encontra-se, predominantemente, sobre a Formação Piramboia (IG, 1984), a qual está sobreposta aos folhelhos e siltitos da Formação Corumbataí em contato discordante (Cortês & Perinotto, 2015). Segundo IPT (1981b), a Formação Piramboia foi depositada entre o Triássico Inferior e o Jurássico Superior, apresentando estratificação cruzada do tipo diagonal, com sedimentos de origem fluvial relacionados a rios meandantes e pequenas lagoas com condição climática dominante de oxidação (Bósio, 1973). A respectiva formação apresenta na bacia hidrográfica do Rio Tietê espessura máxima de 300 m, reduzindo-se para o sul e nordeste do estado de São Paulo (Zaine, 1994).

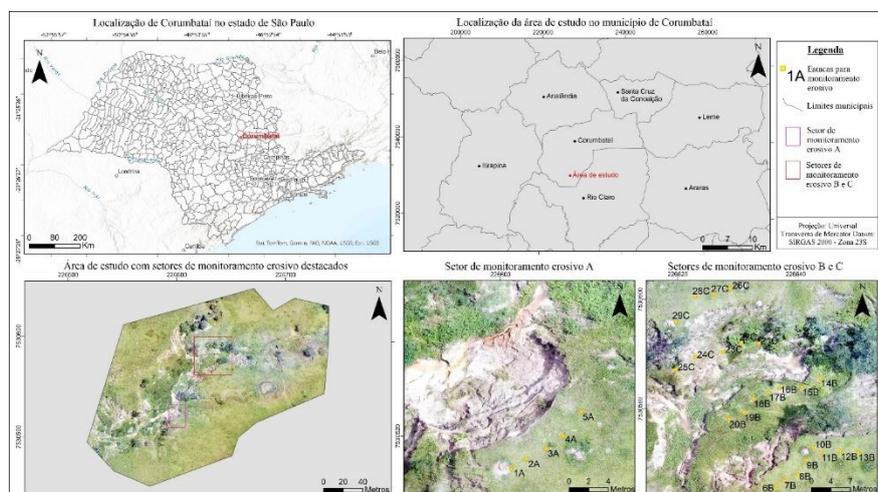


Figura 1. Posicionamento da área de estudo no Estado de São Paulo, no município de Corumbataí e estacas numeradas de monitoramento em campo.

Na área de estudo dominam os Argissolos Vermelho Amarelo Distrófico, da unidade Serrinha

(Koffler et al.,1992), caracterizados por mudança textural abrupta em função da presença de um

horizonte B textural. Em superfície ocorre um domínio de areia de granulometria fina (Oliveira; Prado, 1984). Já na porção nordeste da bacia, segundo Koffler et al. (1992), ocorre uma classe associada composta por Neossolos Quartzarênicos e Latossolo Vermelho Amarelo Álico da unidade São Lucas. Os Neossolos em questão, apresentam horizonte A com estrutura granular fraca associada com grãos simples e horizonte C com organização estrutural não definida (Oliveira; Prado, 1984). Já os Latossolos da unidade São Lucas apresentam textura arenosa no horizonte A e textura média no horizonte B, evidenciando acréscimo escalonado de argila ao longo do perfil até o horizonte B2 (Oliveira & Prado, 1984). Tais classes pedológicas estão sujeitas a uma dinâmica pluviométrica na qual o mês de janeiro constitui-se no mais chuvoso e o de agosto no mês mais seco. Em uma análise histórica (1983 a 2012), o ano de 1983 apresentou o maior volume pluviométrico (2.229,3 mm) e o ano de 2003 o menor volume (1.232,5 mm) (Mello, 2014).

No que se refere aos padrões de uso da terra, a área de estudo é dominada por pasto limpo, sendo os cursos d'água circundados por vegetação arbórea. Tal padrão de uso da terra se repete na bacia hidrográfica do Rio Cabeça, unidade a qual a área de estudo se insere. Segundo Silva e Lupinacci (2021), tal bacia vem sendo ocupada majoritariamente por pastos limpos desde 1988 (42,12% da área da bacia).

#### Mapeamento Geomorfológico

O procedimento iniciou-se pela produção das imagens aéreas de altíssima resolução a partir de um VANT DJI MAVIC Pro que conta com um sensor RGB com 1/2.3" (CMOS) que gera pixels efetivos de 12.35 M (pixels totais 12.71 M). Os planos de voo foram organizados no software DroneDeploy adotando os seguintes parâmetros: altitude fixa de 40 m acima do ponto de decolagem com sobreposição frontal de 75% e 70% de sobreposição lateral, garantindo um Ground Samplig Distance (GSD) de 1,3 cm. Ainda, buscou-se adaptar os parâmetros do plano de voo em relação à autonomia de bateria do VANT (três baterias com disponibilidade média de 20 minutos cada). Embora a correção da altura de voo do VANT em relação às variações altimétricas do terreno seja recomendada para a redução das distorções nos Modelos Digitais de Superfície (Magalhães & Moura, 2021), adotou-se a técnica de voo com altura fixa, pois as variações altimétricas do terreno impostas pelo processo de

voçorocamento não são contempladas pelo modelo global de terreno do SRTM, que é a referência utilizada pelos aplicativos controladores de voo para esses ajustes na altura de voo.

Com as imagens levantadas em campo em 05/02/2022, os ortomosaicos foram processados a partir do software Open Drone Map (ODM) em sua versão online (WebODM). De acordo com os desenvolvedores do ODM, a versão online apresenta mais recursos em relação à desktop, com destaque para a autenticação de usuário, exibições de mapas, exibições 3D e a capacidade de orquestrar vários nós de processamento (executar trabalhos em paralelo). Mesmo com parte do processamento online, um servidor físico é necessário, sendo que para isso utilizou-se a ferramenta Docker Desktop para garantir conectividade entre o projeto online e o servidor. Para tal, as configurações básicas do servidor foram: processador Intel(R) Core (TM) i7-5820K, memória RAM de 64GB e GPU NVIDIA GeForce GTX 1060 6GB.

Para a formulação dos ortomosaicos realizou-se um conjunto de testes com base em contribuições comunitárias obtidas junto aos usuários da OpenDroneMap Community, portal oficial de compartilhamento de informações dos usuários das interfaces do ODM. A partir de avaliações empíricas foram definidos os parâmetros de processamento a seguir. Na função *nó de processamento* selecionou-se, a partir da função *manual*, o servidor correspondente ao computador destinado ao processamento. Buscando atribuir melhor resolução aos ortomosaicos, optou-se por processar os dados em alta resolução (*high resolution*) e, portanto, foi descartado o uso da opção *ignore-gsd*, a qual visa otimizar o tempo de processamento. Uma vez que foi utilizado um servidor local com alta capacidade de processamento, optou-se por não redimensionar a imagem, mantendo a resolução máxima em relação às imagens originais (4000X3000px de dimensão).

Os ortomosaicos apresentaram acurácia posicional planimétrica com erro padrão além dos limites pretendidos para esta pesquisa, uma vez que o modelo de VANT utilizado não possui um receptor GNSS de alta precisão embarcado. Assim, visando melhorar a acurácia posicional planimétrica dos ortomosaicos, coletaram-se coordenadas de marcos físicos distribuídos pela área de estudo através de um receptor GNSS RTK modelo Spectra SP60, visando o

georreferenciamento por reconhecimento visual dos marcos físicos nos ortomosaicos gerados.

Foram coletados 29 pontos de controle para georreferenciamento das imagens, sendo que cada ponto estava associado a um marco físico. Após o ajuste do georreferenciamento da imagem, percebeu-se um deslocamento médio inferior a 2 cm, que permite atender ao Padrão de Exatidão Cartográfica para Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD) Classe-A para a escala de 1:1.000 (DIRETORIA DO SERVIÇO GEOGRÁFICO, 2011). Tal acurácia foi considerada satisfatória para os produtos almeçados nesta pesquisa.

Após o georreferenciamento, o ortomosaico foi exportado a partir do ArcGis Pro e adicionado ao CorelDraw Graphics Suite para mapeamento das feições geomorfológicas. Destaca-se que as dimensões espaciais do ortomosaico foram mantidas, visando evitar distorções. O CorelDraw apresentou alternativas para produção de simbologias com bom dimensionamento e baixa distorção. O processo de mapeamento das feições foi baseado em uma Chave de Interpretação

(Figura 2). A chave de interpretação apresenta a simbologia, muitas criadas para esta pesquisa, e o aspecto na imagem de cada feição (posteriormente avaliadas em campo).

Por fim, para validar a análise dos dados por meio do mapeamento geomorfológico, principalmente a hipótese de indícios de maior evolução das feições erosivas a partir de tal mapeamento, os taludes erosivos foram monitorados em campo, trimestralmente, de 03/08/2020 a 08/02/2023, utilizando estacas como proposto por Guerra (2002), conforme apresentado por Stefanuto e Lupinacci (2023). As estacas foram instaladas a 3 metros de distância do talude, alinhadas a partir de pinos intermediários a fim de garantir que as medidas fossem realizadas no mesmo ponto em todos os trimestres. Lateralmente, a distância foi entre 2 e 3 metros de acordo com as características do terreno (Figura 1). As medidas foram realizadas a partir de trena a laser modelo Leica DISTO™ 5D, com auxílio de régua que projetava verticalmente o talude erosivo.

Recorte do mapa	Símbolo	Identificação	Chave de Interpretação
		Alcova de regressão	
		Talude erosivo principal	
		Talude erosivo secundário	
		Fundo de vale plano	
		Canal pluvial	
		Planície Aluvial	
		Ravina	
		Sulco Erosivo	
		Murundum	
		Duto Colapsado	
		Terracete	
		Vertente Côncava	
		Vertente Convexa	
		Trilhas de gado	
		Bloco Solapado	
		Terraço Aluvial	
		Lago	

Figura 2. Chave de interpretação de feições do sistema erosivo.

## Resultados e discussão

O mapeamento geomorfológico produzido é apresentado na Figura 3 e permitiu constatar a presença de diversas feições de detalhe na área estudada. O primeiro desafio para o mapeamento nesta escala de altíssimo detalhe foi a escolha da simbologia. Assim, tomando por base os trabalhos clássicos de Tricart (1965) e Verstappen e Zuidam (1975), assim como a proposta de Gustavsson, Seijmonsbergen e Kolstrup (2008), foram selecionados símbolos cujo tamanho se adaptavam a dimensão das formas identificadas na imagem. Ainda, alguns desdobramentos de tais símbolos foram necessários para contemplar a riqueza de detalhes passível de ser identificada nas imagens. Assim, os taludes erosivos foram categorizados em principal, caracterizado por maior desnível relativo, e secundário, com menor altura. As ravinas foram mapeadas de acordo com a proposta de Verstappen e Zuidam (1975) para que fosse possível identificar sua configuração espacial com grau de detalhe. É mais comum encontrar mapeamentos de ravinas com símbolos triangulares, como propõem Tricart (1965), de caráter pontual, contudo com o nível de detalhe possível de se obter com imagens de altíssima resolução, a simbologia linear, e, portanto, mais flexível de Verstappen e Zuidam (1975), permitiu detalhar a posição e forma das ravinas.

Para feições passíveis de mapeamento somente em escala de altíssimo detalhe, como alcovas de regressão, blocos solapados, murundum, dutos colapsados, foram criadas simbologias novas, as quais buscaram seguir o princípio pictórico, proposto por Tricart (1965), isto é, buscou-se construir símbolos cuja forma se aproxima das feições mapeadas. Por exemplo, o símbolo do bloco solapado é composto por uma figura retangular, que lembra um bloco, associada a uma seta, a qual busca indicar o movimento do bloco. As alcovas de regressão são representadas por curvas elípticas que estão voltadas para o talude, buscando transmitir a morfologia das alcovas que se caracterizam por escavar o sopé do talude, criando reentrâncias. Os murunduns foram mapeados a partir de adaptação de símbolo proposto por Tricart (1965) para indicar topos arredondados, procurando apontar o caráter circular da forma. Já os dutos colapsados foram mapeados a partir de traços paralelos sendo um destes interrompido a fim de indicar o colapso do teto do duto que se manifesta na imagem como cavidades em superfície. Convém esclarecer que os dutos foram identificados em campo visto que as cavidades de superfície observadas nas imagens não permitem reconhecer o duto. Neste caso, as imagens direcionaram o trabalho de campo, facilitando o processo de identificação.

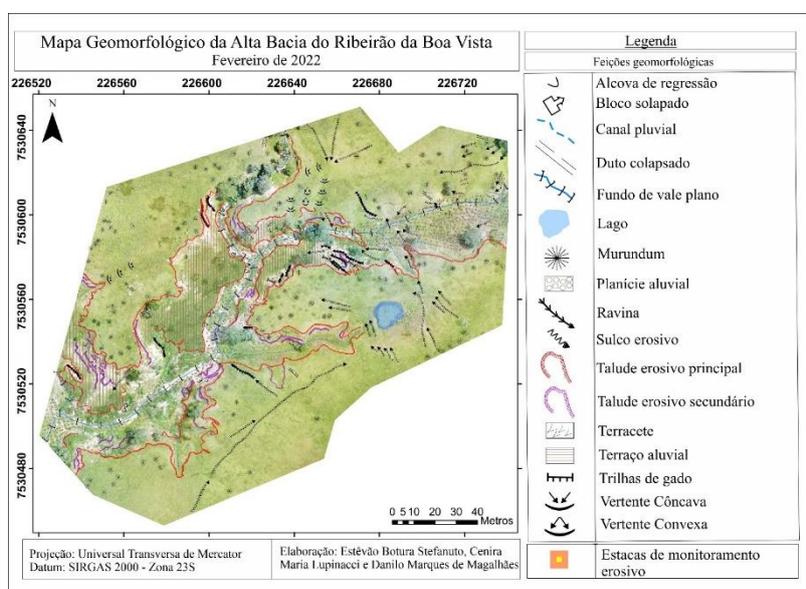


Figura 3. Mapeamento geomorfológico do sistema erosivo estudado (Corumbataí – SP).

As feições mapeadas apontam para diferenciações consideráveis do sistema erosivo em pequeno espaço geográfico (aproximadamente 0,3 km<sup>2</sup>), o que comprova a ideia de que as voçorocas se constituem em feições complexas (Castillo & Gómez, 2016). Assim, o sistema erosivo estudado caracteriza-se pela presença de diversos taludes erosivos (Figura 3 e figura 4A), de dimensões variadas, cuja morfologia curvilínea demonstra um processo erosivo que varia significativamente no espaço. Os taludes fazem inúmeras reentrâncias e avançam de forma irregular demonstrando que há diferenciações

locais, provavelmente de resistência dos materiais, que condicionam a forma como estes evoluem. Loureiro et al. (2020) apontam que estas irregularidades internas se constituem em um dos fatores que levam os dados de volume de material erodido constituírem apenas uma estimativa. Em um sistema como o apresentado neste trabalho, tais dados são ainda mais difíceis de serem precisos, principalmente por se tratar de feição escalonada (Figura 4A), com diversos degraus internos e patamares, que se caracterizam como topos de terraços fluviais que estão sendo erodidos pela incisão fluvial atual.



Figura 4. Em A, taludes erosivos em vários patamares; em B, material lenticulado que está sendo erodido; em C, blocos solapados e em D, Murunduns.

A densidade de feições, principalmente nos setores em que há dois taludes principais, pode ser um indicador da dinâmica mais acelerada. No caso estudado (Figura 1), o monitoramento de campo aponta que os setores com muitas feições relacionadas a caminhos de gado e ravinas (Figura 1, setor B e C) apresentam maior dinâmica de recuo do que aqueles somente com taludes (Figura 1, setor A). Assim, por exemplo, no setor A o maior recuo do talude foi mensurado na estaca 2A (Figura 1), atingindo 0,44m. Já no setor B, o maior recuo registra-se na estaca 15B que atingiu a métrica de 2,22m e na estaca 21C que apresentou recuo de 1,84m. Desta forma, os valores extremos encontrados neste sistema erosivo ocorrem em setores cuja frequência de morfologias erosivas, como as ravinas no setor B, ou a proximidade do canal fluvial, como no setor C, é maior. Este princípio tem que ser verificado para outros sistemas, contudo, compreende-se que a densidade de feições são indicadores importantes da dinâmica evolutiva das voçorocas. Ainda, convém destacar que estes pontos com medidas extremas de recuo do talude estão constituídos por depósitos fluviais antigos (Figura 3B), que caracterizam os terraços. Portanto, tais materiais, de caráter lenticular (Penteado, 1979), apresentam menor coesão.

Os blocos solapados (Figura 4C) também se constituem em um indicativo importante da dinâmica do talude erosivo. Conforme constatado em monitoramento de campo, o processo de solapamento é bastante complexo, marcado inicialmente por uma inclinação do talude, que leva a um distanciamento maior deste das estacas, levando a medidas de aparente acréscimo de material ao talude. Seguido a este processo, tem-se medidas de recuo bastante significativas. Assim, ao longo do tempo de monitoramento, as medidas de campo apresentam uma aparente incoerência inicial, com aumento da distância entre as estacas e os taludes, para, posteriormente, registrar-se um avanço significativo da perda de materiais. Portanto, os blocos solapados, quando mapeados, como proposto, podem ser um indicativo desta complexidade processual, apontando para setores mais ativos das voçorocas.

Na área estudada destaca-se a presença de micro relevos vinculados a presença de térmitas (Figura 4D). Com o uso de imagens de altíssima resolução é possível o mapeamento de tais feições, inclusive de forma automática, como aponta Silva et al. (2020). Embora não haja consenso sobre o significado destas feições, ocorrendo ampla

discussão se estas são indicativos de pastagens degradadas (Valério, 2006) ou não (Lima *et al.*, 2011), o fato importante é que tais feições criam obstáculo físico para o gado e indicam a falta de manejo (Valério, 2006) deste padrão de uso da terra. Ainda, os montículos alteram os processos de escoamento superficial, criando uma umidade maior em seu entorno, a qual é denunciada por uma vegetação mais verde na imagem de altíssima resolução. Assim, o mapeamento de tais micro relevos podem se tornar um indicativo de manejo deficitário de pastagens, dando subsídio a compreensão do desenvolvimento das feições erosivas. Ainda, se considerarmos a importância do escoamento superficial para o desenvolvimento dos processos erosivos, tal alteração provocada pelos montículos pode ser aspecto relevante de análise.

As imagens de altíssima resolução também permitem mapear as feições erosivas lineares em estágios menos avançados como sulcos erosivos e ravinas (Figura 5A). Considerando que muitas vezes tais feições se conectam às voçorocas (Zanatta, 2018) e contribuem para seu avanço, alimentando a dinâmica erosiva das feições maiores, o mapeamento destas pode auxiliar na identificação dos setores mais dinâmicos. Na área de estudo verifica-se que os taludes se tornam mais irregulares, com diversas reentrâncias, a partir da presença de tais feições.

Os terrenos encharcados, mapeados como extensa planície aluvial no setor leste, que caracteriza o setor montante do sistema fluvial imageado (Figura 5B), cede lugar a um rio mais encaixado e envolto por uma planície restrita, com terraços que se tornam mais extensos na margem direita do rio principal (Figura 5A). Este setor de transição é marcado por várias ravinas e reentrâncias do talude, apontando para uma possível mudança na constituição dos materiais. Teoricamente, segundo IG (1984), trata de um sistema desenvolvido sobre a Formação Pirambóia, contudo a morfologia de superfície a partir deste setor, com maior dissecação dos terrenos, acompanhado por uma multiplicação dos taludes erosivos, demonstra que há variações nos materiais que vão torná-lo mais suscetível a incisão pela erosão linear. Admite-se que a Formação Pirambóia foi depositada em ambiente “constituído predominantemente por canais fluviais entrelaçados, com depósitos eólicos subordinados” (Côrtes & Perinotto, 2015, p. 39). Assim, esta

variação de ambiente já demonstra uma possível diversidade de materiais, a qual é discutida e ilustrada por Côrtes e Perinotto (2015), que identificaram quatro fácies e várias associações de fácies em depósitos na região. Portanto, considera-se que esta diversidade de materiais, quando submetidos a dinâmica fluvial e a erosão linear acelerada, vai produzir variações morfológicas significativas, incluindo níveis de dissecação fluvial variados. As imagens de altíssima resolução também permitem mapear as feições erosivas

lineares em estágios menos avançados como sulcos erosivos e ravinas (Figura 4A). Considerando que muitas vezes tais feições se conectam as voçorocas (Zanatta, 2018) e contribuem para seu avanço, alimentando a dinâmica erosiva das feições maiores, o mapeamento destas pode auxiliar na identificação dos setores mais dinâmicos. Na área de estudo verifica-se que os taludes se tornam mais irregulares, com diversas reentrâncias, a partir da presença de tais feições.

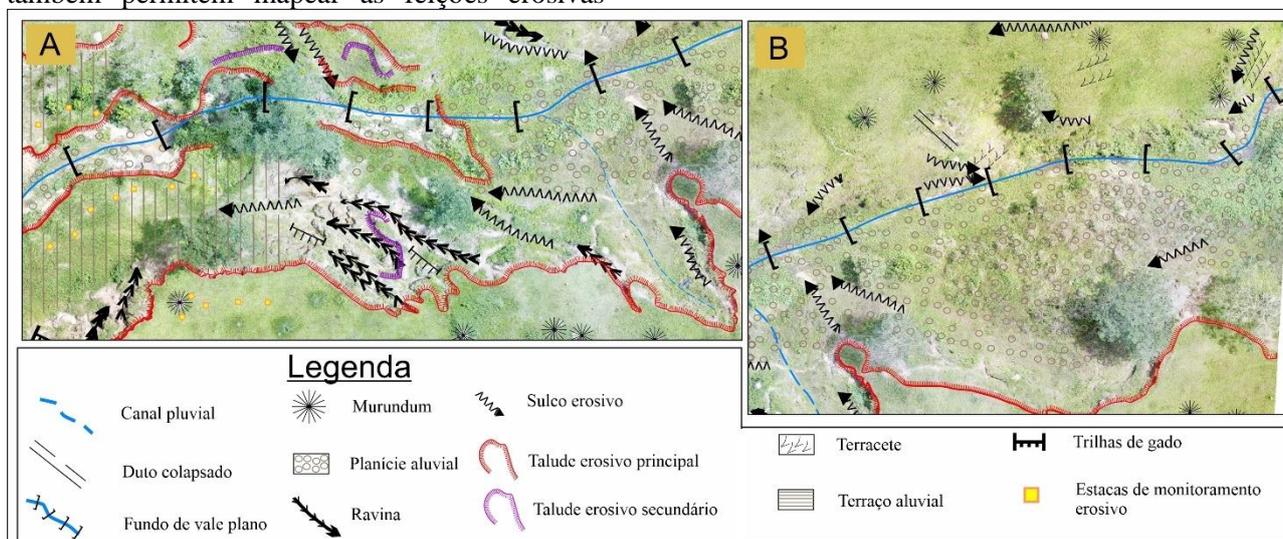


Figura 5. Em A, tem-se um exemplo da presença de sulcos e ravinas que coalescem com os taludes erosivos do sistema de voçorocamento; ainda apresenta a área de transição entre uma dinâmica fluvial marcada por planícies aluviais extensas para uma dinâmica de maior dissecação do relevo, com planícies restritas e terraços fluviais. Em B, apresenta-se a presença dos terracetes, cuja evolução dá origem a sulcos erosivos que nem sempre obedecem ao caimento do relevo, assim como a extensa planície aluvial que caracteriza o setor montante do sistema erosivo estudado.

Por se tratar de áreas de pastagem antigas, submetidas ao pisoteio do gado, os terracetes vinculados a aceleração do processo de *creeping*, foram identificados nas imagens de altíssima resolução (Figura 5B e 6A). Constatou-se também que, conforme tais feições adquirem taludes mais íngremes entre um degrau e outro, é frequente a presença de sulcos erosivos entremeados aos terracetes, os quais muitas vezes não obedecem ao caimento geral da topografia devido a sua origem. Dessa forma, a frequência dos terracetes pode se constituir em um indicativo de tendência ao desenvolvimento de sulcos erosivos, os quais constituem o estágio inicial de feições vinculadas a erosão linear acelerada e podem dinamizar o desenvolvimento dos taludes. Ainda, com a altíssima resolução das imagens, foi possível diferenciar tais terracetes das trilhas de gado

(Figura 6B), as quais encontram-se vinculadas aos caminhos para dessedentação. Na área de estudo, há uma sequência de trilhas de gado que dão origem às ravinas (Figura 3 e, em detalhe, 4A) as quais se posicionam no sopé do talude principal superior. Estas trilhas auxiliam no desmonte dos taludes, sendo fator importante na evolução do sistema. Ainda, na busca por simbologia para tal feição, constatou-se que Tricart (1965) propõem símbolo para o que denomina de “*pie de vague*” e considera esta morfologia como uma feição localizada, incluída no grupo formas vertentes e interflúvios e não no modelado antrópico, proposto pelo próprio autor. Já Verstappen e Zuidam (1975) propõem o mapeamento das “trilhas de gado”, com o símbolo utilizado neste trabalho (Figura 2), em mapas com fins especiais, voltados para a morfoconservação. Assim, foi possível constatar

que, desde os autores clássicos, o efeito do trânsito do gado sobre o relevo já era reconhecido e estas feições apontadas como elemento importante para o entendimento dos processos denudativos.

As diversas feições erosivas identificadas geram um excesso de materiais que atingem os fundos de vale, criando planícies e terraços fluviais. O mapeamento produzido, ao individualizar as planícies e os terraços, permite levantar a hipótese de que o sistema estudado passa por fase de retomada erosiva que provoca a dissecação dos seus sedimentos mais antigos, que atualmente constituem os terraços fluviais. Dias e Perez Filho (2015), em estudo sobre a bacia do rio Corumbataí, a qual abarca a área estudada, aponta para diversos níveis de terraço fluvial neste canal principal, atribuindo tal comportamento as

oscilações climáticas quaternárias. Lupinacci e Souza (2019), ao analisarem outro afluente do rio Corumbataí, também corroboram com esta ideia, identificando quatro fases de elaboração dos terraços fluviais. Assim, a área de estudo pode se constituir em um pequeno fragmento deste espaço mais amplo, demonstrando que esta dinâmica regional de retomadas sucessivas de incisão fluvial já atinge os canais de primeira e segunda ordem da bacia do rio Corumbataí. Contudo, tal hipótese ainda necessita de dados mais precisos para ser testada visto que, tradicionalmente (Penteado, 1979), a presença de terraços fluviais tem sido atribuída a retomadas erosivas provocadas por ações tectônicas regionais que, ao desequilibrarem o sistema fluvial, levam a processos de incisão em busca de novo equilíbrio.



Figura 6. Em A, terracetes com taludes expostos; Em B, trilhas de gado.

### Considerações finais

Conforme estabelecido no objetivo, as imagens de altíssima resolução possibilitaram alto nível de detalhamento do mapeamento geomorfológico produzido, permitindo avaliar a articulação espacial entre as formas erosivas e deposicionais, o que auxilia no entendimento da mobilidade dos materiais de superfície assim como da dinâmica vertente-fundo de vale da área estudada.

Sobre o processo de mapeamento, os manuais tradicionais da cartografia geomorfológica não devem ser ignorados, contudo há necessidade de

construção de novas simbologias para feições de detalhes. Sobre tais simbologias, enfatiza-se a importância da busca pelo caráter pictórico, tradicionalmente colocado pela bibliografia clássica francesa como aspecto primordial para uma leitura mais rápida dos mapeamentos geomorfológicos.

A interpretação das imagens para a identificação das formas exige habilidade técnica, incluindo experiência de campo, contudo, a alta resolução do material facilita o processo, permitindo obter dados a partir da articulação espacial das formas os quais nem sempre são perceptíveis em campo. Assim, a visualização em

escala de altíssimo detalhe permitiu avaliar certas morfologias que dificilmente seriam mapeadas com outros produtos de sensoriamento remoto. Por fim, convém enfatizar que muitas questões, levantadas a partir da interpretação das imagens de altíssima resolução, orientaram as atividades de campo, facilitando esta atividade que normalmente é onerosa para as pesquisas geomorfológicas.

### Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001 e da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), Brasil. Processo nº 2024/00296-1.

### Referências

- Bezerra, M.O., Baker, M., Palmer, M.A., Filoso, S. (2020). Gully formation in headwater catchments under sugarcane agriculture in Brazil. *J. Environ. Manage.* v. 270, p. 110271. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110271>
- Bósio, N. J. (1973). Geologia da Área de São Pedro. [Tese Doutorado, Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, USP, São Paulo].
- Castillo, C., & Gómez, J. A. (2016). A century of gully erosion research: Urgency, complexity and study approaches. *Earth-Science Reviews*, v. 160, p. 300-319, <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.07.009>
- Côrtes, A. R. P., & Perinotto, J. A. de J. (2015). Fácies e associação de fácies da Formação Piramboia na região de Descalvado (SP). *Geologia USP. Série Científica, [S. l.]*, v. 15, n. 3-4, p. 23-40. <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9095.v15i3-4p23-40>
- Chu, S., Ouyang, J., Liao, D., Zhou, Y., Liu, S., Shen, D., Wei, X., Zeng, S. (2019). Effects of enriched planting of native tree species on surface water flow, sediment, and nutrient losses in a Eucalyptus plantation forest in southern China. *Science of the Total Environment*, v. 675, p. 224–234. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.214>
- Dalzell, B. J., Fissore, C., Nater, E. A. (2022). Topography and land use impact erosion and soil organic carbon burial over decadal timescales. *CATENA*, v. 218, p. 106578. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106578>
- Dias, R. L., Perez Filho, A. (2015). Geocronologia de terraços fluviais na bacia hidrográfica do Rio Corumbataí (SP) a partir de luminescência opticamente estimulada. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 16, n.2. <https://doi.org/10.20502/rbg.v16i2.644>
- Diretoria do Serviço Geográfico (2011). *Especificação Técnica para a Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais: Relatório Técnico*. DSG.
- Facadio, A. C., Sato, A. M., Netto, A. L. C. (2023). Eucalyptus Planting in Pasture Matrix and Erosive Reactivation of Gullies in the Sesmaria River Basin (SP/RJ): a cycle of instability in headwater valleys. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 24, n. 00. <https://doi.org/10.20502/rbgeomorfologia.v24i00.2326>
- Frankl, A., Nyssen, J., De Dapper, M., Haile, M., Billi, P., Munro, R. N., Poesen, J. (2011). Linking long-term gully and river channel dynamics to environmental change using repeat photography (Northern Ethiopia). *Geomorphology*, v. 129, n. 3-4, p. 238–251, <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.02.018>
- Frankl, A., Poesen, J., Deckers, J., Haile, M., Nyssen, J. (2012). Gully head retreat rates in the semi-arid highlands of Northern Ethiopia. *Geomorphology*, v. 173-174, p. 185–195. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.06.011>
- García-ruiz, J. M., Nadal-romero, E., Lana-renault, N., Beguería, S. (2013). Erosion in Mediterranean Landscapes: Changes and future challenges. *Geomorphology*, v.198, p. 20-36. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.05.023>
- Guerra, A. J. T. (2002). *Processos Erosivos nas Encostas*. In Cunha, S. B. da., Guerra, A. J. T. (Org.). *Geomorfologia: Exercícios, Técnicas e Aplicações* (2 ed, p. 139-155). Bertrand Brasil.
- Gustavsson, M., Kolstrup, E., Seijmonsbergen, A. C. (2006). A new symbol-and-GIS based detailed geomorphological mapping system: Renewal of a scientific discipline for understanding landscape development. *Geomorphology*, n. 77, p. 90–111. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.01.026>

- Gustavsson, M., Seijmonsbergen, A. C., Kolstrup, E. (2008). Structure and contents of a new geomorphological GIS database linked to a geomorphological map — With an example from Liden, central Sweden. *Geomorphology*, n. 95, p. 335-349. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.06.014>
- Instituto Geológico do Estado de São Paulo. (1984). *Formações Geológicas de Superfície*. IG.
- Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. (1981a). *Mapa geomorfológico do estado de São Paulo: Nota Explicativa*. IPT.
- Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. (1981b). *Mapa geológico do estado de São Paulo: Nota Explicativa*. IPT.
- Julian, C., Nunes, J. O. R. (2020). Uso de VANT e geoprocessamento para o cálculo de solo erodido em voçoroca localizada no distrito de Amadeu Amaral. Marília/SP - Brasil. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 21, n.4, pp. 835-845. <https://doi.org/10.20502/rbg.v21i4.1818>.
- Koffler, N. F. et al. (1992). *Solos da bacia do Rio Corumbataí. Rio Claro Escala: 1:50.000*. Departamento de Cartografia e Análise da Informação Geográfica.
- Li, Y., Li, J., Are, K. S., Huang, Z., Yu, H., Zhang, Q. (2019). Livestock grazing significantly accelerates soil erosion more than climate change in Qinghai-Tibet Plateau: Evidenced from <sup>137</sup>Cs and <sup>210</sup>Pbex measurements. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v. 285, p. 106643. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.106643>.
- Lima, S. S., Alves, B. J. R., Aquino, A. M., Mercante, F. M., Pinheiro, E. F. M., Sant'anna, S. A. C., Urquiaga, S., Boddey, R. M. (2011). Relação entre a presença de cupinzeiros e a degradação de pastagens. *Pesq. agropec. bras.*, v.46, n.12, p.1699-1706. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2011001200016>
- Loureiro, H. A. S., Guerra, A. J. T., & Andrade, A. G. de. (2020). Contribuição ao estudo de voçorocas a partir do uso experimental de Laser Scanner Terrestre e VANT. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 21, n. 4, pp. 871-892, <https://doi.org/10.20502/rbg.v21i4.1880>
- Lupinacci, C. M., Souza, T. de A. de. (2019). Terraços fluviais como indicadores da dinâmica geomorfológica no Quaternário: Estudo de caso na Depressão Periférica Paulista. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 20, n. 2, <https://doi.org/10.20502/rbg.v20i2.1562>
- Magalhães, D. M., Moura, A. C. M. (2021). Análise da Morfologia de Modelos Digitais de Superfície Gerados por VANT. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 73, n. 3. <https://doi.org/10.14393/revbrascartogr>
- Mello, B. F. (2014). *Dinâmica pluvial e turismo em Corumbataí – SP*. [Dissertação Mestrado em Geografia, Programa de Pós-graduação em Geografia, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro] Repositório: <http://hdl.handle.net/11449/124146>
- Oliveira, J. B. de, Prado, H. do. (1984). Levantamento Pedológico Semidetalhado do Estado de São Paulo: Quadrícula de São Carlos – II Memorial Descritivo. *Boletim Técnico N° 98*.
- Penteado, M.M. (1929). *Fundamentos de Geomorfologia* (2ª ed). FIBGE.
- Peñuela, A., Hayas, A., Infante-Amate, J., et al. (2023). A multi-millennial reconstruction of gully erosion in two contrasting Mediterranean catchments. *CATENA*, v. 220, p. 106709. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106709>
- Poesen, J., Nachtergaele, J., Verstraeten, G., Valentin, C. (2003). Gully erosion and environmental change: importance and research needs. *Catena*, v. 50, n. 2-4, p. 91–133. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(02\)00143-1](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(02)00143-1).
- Rademann, L. K., Trentin, R. (2020). Novas geotecnologias aplicadas ao estudo geomorfológico: exemplo de morfometria da Voçoroca do Areal, Cacequi-RS. *GeoTextos*, v. 16, n.1, pp. 209-230. <https://doi.org/10.9771/geo.v16i1.35474>
- Silva, G. A. da, Borges, M. dos S., Rodrigues, S. C. (2020). Avaliação geomorfométrica de campo de murundus no Chapadão do Diamante, Serra da Canastra, Minas Gerais, Brasil. *Caderno de Geografia*. v. 30 n. 1, Número Especial - Serra da Canastra. <https://doi.org/10.5752/P.2318-2962.2020v30nesp1p36-51>
- Silva, M. De M., Lupinacci, C. M. (2021). Feições Erosivas Lineares em Ambientes de Cuesta: estudo de caso no interior paulista. *GEOGRAFIA (Londrina)*, v. 30, n. 1, p. 421–437. <https://doi.org/10.5433/2447-1747.2021v30n1p421>

- Stefanuto, E. B., Lupinacci, C. M. (2023). Analysis of the sidewal dynamics of a gully system: Causes and processes. *RAEGA - O Espaço Geográfico em Análise*, v. 58, p. 118. <http://dx.doi.org/10.5380/raega.v58i0.93816>
- Tebebu, T.Y., Abiy, A.Z., Zegeye, A.D., Dahlke, H.E., Easton, Z.M., Tilahun, S.A., Collick, A.S., Kidnau, S., Moges, S., Dadgari, F., Steenhuis, T.S. (2010). Surface and subsurface flow effect on permanent gully formation and upland erosion near Lake Tana in the northern highlands of Ethiopia. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, v. 14, n. 11, p. 2207–2217. <https://doi.org/10.5194/hess-14-2207-2010>
- Tricart, J. (1965). *Principes et méthodes de la géomorphologie*. Masson.
- Valério, J. R. (2006). *Cupins-de-montículo em pastagens*. EMBRAPA.
- Vanmaercke, M., Poesen, J., Van Mele, B., Demuzere, M., Bruynseels, A., Golosov, V., Yermolaev, O. (2016). How fast do gully headcuts retreat? *Earth-Science Reviews*, v. 154, p. 336–355. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.01.009>
- Verstappen, H. T., Zuidan, R. A. Van. (1975). *ITC System of geomorphological survey*. (v. 1, cap. 8). Enschede.
- Vieira, A. F. S. G., Frota Filho, A. B. da. (2023). Avaliação das técnicas de monitoramento de voçorocas: o exemplo da Região Metropolitana de Manaus-AM, na região amazônica. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 24, n. 00, e2302. <https://doi.org/10.20502/rbg.v24i00.2302>
- Vieira, A. F. S. G., Lima, C. M. R., Silva, G. M. da. (2023). Caracterização das voçorocas da área urbana de Rio Preto da Eva (AM), Norte do Brasil. *Geologia USP. Série Científica*, v. 22, n.4, pp. 95-107. <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9095.v22-195101>
- Zaine, J. E. (1994). *Geologia da Formação Rio Claro na folha Rio Claro (SP)*. [Dissertação Mestrado em Geologia Regional, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro]. Repositório: <http://hdl.handle.net/11449/102900>
- Zanatta, F. A. S. (2018). *Limitação física em área rural degradada: busca metodológica para definir o uso adequado das terras* [Tese Doutorado em Geografia, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro]. Repositório: <http://hdl.handle.net/11449/166365>