



Identificação de processos erosivos através de modelos hidrológicos e imagens aéreas de alta resolução

Maíra Guarlot WEIS¹, Normandes Matos da SILVA¹, Dhonatan Diego PESSI^{2*},
Domingos Sávio BARBOSA¹, Rodrigo Martins MOREIRA³, Roberto Bueno LUIZ⁴,
Antonio Conceição PARANHOS FILHO²

¹Programa de Pós-Graduação em Gestão e Tecnologia Ambiental, Universidade Federal de Rondonópolis, Rondonópolis, MT, Brasil.

²Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais pela Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, MS, Brasil.

³Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Rondônia, Ji-Paraná, RO, Brasil.

⁴Universidade Federal de Rondonópolis, Rondonópolis, MT, Brasil.

E-mail: dhonatan.pessi@gmail.com

ORCID: (0000-0003-1697-9842; 0000-0002-4631-9725; 0000-0003-0781-785X;
0000-0001-6793-0956; 0000-0001-6794-6026; 0000-0001-5842-7785; 0000-0002-9838-5337)

Submetido em 14/03/2022; Aceito em 24/08/2022; Publicado em 14/09/2022.

RESUMO: A pesquisa utilizou uma rotina de confecção de rede de drenagem por meio de Sistemas de Informações Geográficas para detecção e dimensionamento de erosões lineares em área de pastagem degradada, a partir de imagens derivadas de um drone. Numa área de pastagem de 77 hectares, situada em Rondonópolis, Mato Grosso, no bioma Cerrado, a partir de missões com RPA foi possível a captura de 478 imagens aéreas com alta resolução espacial (2cm por pixel), que foram processadas para a geração de um ortomosaico de fotografias aéreas, e confecção do Modelo Digital de Elevação - MDE. Na sequência, por meio do MDE houve a extração da rede de drenagem, incluindo a formação de ravinas no terreno, que, quando confrontado com a inspeção do mosaico, permitiu a identificação de processos erosivos lineares. Foram identificados 7 processos erosivos, que possuíam área média de 1.473 m². O uso das ferramentas de hidrologia no processamento do MDE evidenciou os processos erosivos da área, classificando-os como rede de drenagem e a sobreposição das curvas de nível permitiu observar a direção de evolução desses impactos. A junção dessas análises favoreceu uma análise individual de cada processo erosivo, facilitando assim o planejamento particularizado de medidas e intervenção individualizada.

Palavras-chave: perda de solo; rede de drenagem; geoprocessamento; drone.

Identification of erosion processes through hydrological models and high resolution aerial images

ABSTRACT: The research used a routine of making a drainage network through Geographic Information Systems for detection and dimensioning of linear erosions in a degraded pasture area, from images derived from a drone. In a pasture area of 77 hectares, located in Rondonópolis, Mato Grosso, in the Cerrado biome, from RPA missions it was possible to capture 478 aerial images with high spatial resolution (2cm per pixel), which were processed to generate an orthomosaic of aerial photographs, and creation of the Digital Elevation Model - MDE. Subsequently, through the MDE, the drainage network was extracted, including the formation of ravines on the ground, which, when confronted with the inspection of the mosaic, allowed the identification of linear erosive processes. Seven erosive processes were identified, which had an average area of 1,473 m². The use of hydrology tools in the MDE processing evidenced the erosive processes in the area, classifying them as a drainage network and the superposition of the contour lines made it possible to observe the direction of evolution of these impacts. The combination of these analyzes favored an individual analysis of each erosive process, thus facilitating the individualized planning of measures and individualized intervention.

Keywords: soil loss; drainage network; geoprocessing; drone.

1. INTRODUÇÃO

Erosão é um problema crítico em todo o mundo, causando perda de solo de maneira quantitativa e qualitativa com sérias consequências, como ameaçar a segurança alimentar (COLMAN et al., 2019). O dossel e a composição radicular da vegetação nativa, assim como a adequada gestão do terreno, mantêm uma relação de contenção do processo de erosão natural, reduzindo o impacto das gotas da chuva no solo. Quando a vegetação é removida do solo sem a devida manutenção do terreno, dada as características de

pluviosidade, topografia, tipo de solo, pode surgir um processo erosivo, resultando em perda do solo (INACIO et al., 2007; WANG et al., 2016).

O Brasil apresenta cerca de 147 milhões de hectares de pastagens nativas ou exóticas (IBGE, 2017), sendo que no bioma Cerrado, que ocupa 24% do território nacional e contribui significativamente com a produção agropecuária do país, existem 55 milhões de hectares de pastagens que podem estar em processo de degradação ou degradadas (PERON; EVANGELISTA, 2004; ANDRADE et al., 2016).

Para superar o desafio do monitoramento de um bioma com ampla extensão como o Cerrado, o uso de produtos de sensoriamento remoto e de técnicas de processamento de imagem vêm se mostrando cada vez mais eficazes na identificação de áreas onde há ocorrência de processos erosivos (CÂNDIDO, 2019).

Os drones representam uma estratégia com relativo baixo risco de acidentes e reduzido custo financeiro, para observar de forma rápida e sistemática os fenômenos naturais em alta resolução espaço-temporal (PESSI et al., 2021), possuem diversas aplicações, desde as mais simples como fazer imagens aéreas, onde é necessário que carregue apenas uma câmera, até procedimentos mais complexos como dispersão de sementes, para uso na silvicultura ou na recuperação de áreas degradadas, e levantamento de altimetria do terreno pela fotogrametria (PERREIRA et al., 2021; PESSI et al., 2021).

A pesquisa teve como objetivo utilizar uma rotina de confecção de rede de drenagem, a partir de processamento de imagens aéreas de alta resolução espacial obtidas por drone. Essa rotina metodológica buscou identificar e dimensionar processos erosivos lineares, com o uso de sensores suborbitais, numa fase inicial de evolução, para com isso auxiliar na escolha de medidas mitigadoras mais adequadas para cada caso.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Caracterização da área de estudo

Rondonópolis está localizada na região sudeste de Mato Grosso, latitude 16°28'15" sul, longitude 54°38'08" oeste e altitude média de 227 metros. Situa-se a 215 km da capital Cuiabá e representa cerca de 0,48% da área total do estado, com uma área de 4.159,122 Km² (IBGE, 2010).

A área de estudo se encontra na região nordeste do município de Rondonópolis, ao lado do Campus da Universidade Federal de Rondonópolis (UFR). Com uma área de aproximadamente 77 hectares (Figura 1). A área imageada está no bioma Cerrado, na Depressão Rio Paraguai, que se caracteriza por extensas superfícies territoriais aplainadas (IBGE, 2010).

A classe de solo da região é definida como sendo Latossolo Vermelho Distrófico, o clima local é definido como CWA (clima subtropical úmido) com média anual em precipitação de 1500 mm e na temperatura de 25°C. A altitude do local de estudo está aproximadamente a 293 m a nível do mar (PESSI et al., 2021). A formação vegetal da região é mais comum o Cerrado, composto por fitofisionomias distintas sendo elas o Cerradão, Cerrados, Formação Savânica associada a vertentes e Floresta Estacional semidecídua com composição florística típica e com diferentes graus de caducifólia na estação da seca (PESSI; LOVERDE-OLIVEIRA, 2019).

A coleta de imagens aéreas ocorreu a partir de voo planejado e automatizado por meio de um drone, conhecido também por Aeronave Remotamente Pilotada (ARP), modelo DJI Phantom 4 Pro. A aeronave possui um sistema de geolocalização do tipo GNSS, sensores anticolisão, câmera RGB de 20 megapixels, tendo autonomia de voo de aproximadamente 25 minutos. A missão foi planejada e executada no software DroneDeploy versão 3.3.0 2018. Foram coletados quatro pontos de apoio na área com o objetivo de melhorar a acurácia dos produtos gerados a partir das imagens obtidas com o uso de um equipamento RTK (*Real Time Kinematic*) Topcon. Os valores da acurácia e erros a partir do levantamento dos pontos de controle estão descritos na Tabela abaixo (Tabela 1).

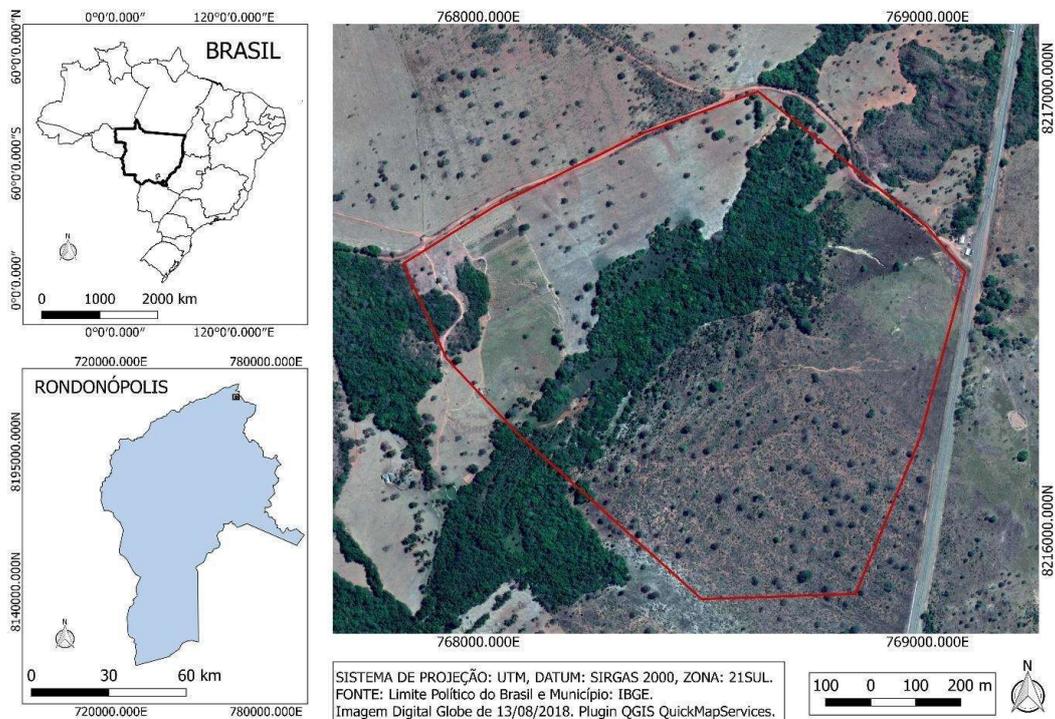


Figura 1. Localização da área de estudo numa área com fragmento de Cerrado e área com presença de pastagem para gado. A linha em vermelho é o quadrante da área utilizada para o estudo.

Figure 1. Location study area in an area with presence a Cerrado fragment and an area with pasture for cattle. The red line is the quadrant of the area used for the study.

Tabela 1. Erros fornecidos pelo relatório de processamento do software Agisoft Metshape Profissional com a inserção dos pontos de controle, contendo os erros médios de localização da câmera, onde o eixo X corresponde ao Leste, o eixo Y ao Norte e o eixo Z a Altitude.

Table 1. Errors provided by the Agisoft Metshape Professional software processing report with the insertion of control points, containing the average camera location errors, where the X axis corresponds to East, the Y axis to North and the Z axis to Altitude.

Pontos	Eixos		
	X erro (m)	Y erro (m)	Z erro (m)
Ponto 1	-0.0090078	0.046309	0.00197
Ponto 2	-0.0021907	-0.06061	-0.0021
Ponto 3	0.0135895	-0.00458	0.0012
Ponto 4	-0.002907	0.01888	-0.0005
Média Total	0.0082	0.03935	0.00161

Pontos	Erro total nas três dimensões
	Total em (m)
Ponto 1	0.0472185
Ponto 2	0.0606929
Ponto 3	0.0143945
Ponto 4	0.0190161
Média Total	0.0402555

2.2. Processamento de imagens

O processamento das imagens ocorreu em duas etapas, a primeira foi a confecção do Modelo Digital de Terreno (MDT) executada no software Agisoft Metashape Profissional versão 1.4.1, a partir da reprojeção dos arquivos de imagem que estavam no formato JPEG, para o Sistema de Referência de Coordenadas – EPSG 31981, coordenadas UTM, fuso 21, Datum Sirgas 2000. Após isso ocorreu o alinhamento dos arquivos JPEG e geração da nuvem esparsa de pontos. A nuvem esparsa de pontos foi densificada para a produção de um arquivo 3D, que deu base para a geração do ortomosaico e para o modelo digital de elevação (MDE). A nuvem densa de pontos foi classificada no metashape, para a geração de um modelo digital que excluiu os elementos presentes no terreno sobre a o solo, tais como postes, árvores, etc, resultando no MDT. O ortomosaico, o MDE e o MDE classificado foram exportados no formato Geotiff.

Na segunda, a partir do MDE classificado e importado para o programa ArcGis, na confecção da rede de drenagem da área de estudo, utilizando as ferramentas de Spatial Analyst. O processamento de dados se deu de acordo com as etapas contidas no fluxograma da Figura 2.

2.3. Gerando a direção de fluxo

O primeiro passo para a delimitação de microbacias foi a confecção da direção de fluxo de água da rede de drenagem na área de estudo. Essa direção simula o caminho que a água e os sedimentos percorrem através da topografia da área de estudo (NARDI et al., 2008), sendo o dado base para trabalhos de modelagem hidrológica.

Para a confecção da direção de fluxo foi utilizada a ferramenta Flow Direction, contida na caixa de ferramentas Hidrologia no menu Spatial Analyst.

2.4. Preenchimento de falhas do MDE

O MDE é proveniente de um mosaico de nuvem de pontos densificada, com resolução espacial de aproximadamente 2 cm por pixel, com poucas distorções derivadas principalmente de ruídos na mosaicagem, e que

contém pequenas falhas sob a forma de pixels espúrios, que devem ser corrigidos (LUEDELING et al., 2007).

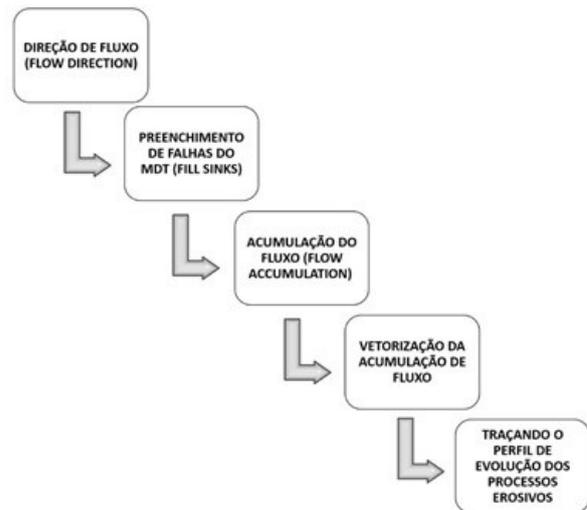


Figura 2. Fluxograma de trabalho para a rotina de confecção de rede de drenagem da área executado no software ArcGis.

Figure 2. Work flowchart for the routine of making a drainage network in the area executed in the ArcGis software.

A correção dessas falhas se deu em duas etapas. Na primeira foi utilizada a ferramenta Sinks, responsável por identificar as falhas existentes no MDE utilizando como dado de entrada o produto gerado anteriormente na direção de fluxo. Este processo visa corrigir pixels ou células com valores muito menores que seus vizinhos, causando um buraco no MDE, onde não deveria haver um.

Após a identificação das falhas é necessário preenchê-las, para isso utilizou-se a ferramenta Fill que deve ser executada diretamente no MDE, e não na direção de fluxo como anteriormente. Essa função terá gerado um novo MDE já corrigido, e é este produto que será usado nas próximas etapas de processamento.

2.5. Gerando a acumulação de fluxo

A acumulação de fluxo (ou fluxo acumulado) é também denominada área de captação, e segundo MENDES & CIRILO (2001) representa a rede hidrográfica ou rede de drenagem da área de estudo.

Para gerar o fluxo acumulado foi utilizada a ferramenta Flow Direction do ArcGis, o dado de entrada é o MDE já corrigido, e na opção tipo de dado deve-se mudar para inteiro (integer).

O produto de saída do fluxo acumulado é a rede de drenagem, gerada a partir dos pontos de maior profundidade do relevo, a acumulação de fluxo mostra sulcamentos no terreno, que podem ser processos erosivos, sendo possível individualizar as erosões lineares e mediante interpretação conjunta com o ortomosaico de imagens aéreas, inferir a tendência de evolução do processo erosivo.

O fluxo acumulado foi vetorizado utilizando as ferramentas de edição do software com o intuito de ser utilizado posteriormente na sobreposição de dados para uma melhor visualização dos mesmos.

Para traçar o perfil de evolução dos processos erosivos da área utilizou-se o MDE, o fluxo acumulado e as curvas de nível geradas para a área de acordo com a metodologia utilizada. Com os arquivos sobrepostos é possível identificar a direção de crescimento de cada processo erosivo.

3. RESULTADOS

A Figura 3 é o resultado obtido através da sobreposição das curvas de nível e do fluxo acumulado de água no MDE.

Estudos hidrológicos, a partir de dados extraídos de imagens orbitais e suborbitais são importantes e determinantes para um manejo adequado do solo, sendo a modelagem hidrológica uma ferramenta de análise que gera um cenário detalhado dos fenômenos físicos de uma área (MORAES, 2003). O uso e ocupação do solo devem estar aliados ao gerenciamento adequado de recursos hídricos, para evitar ou amenizar impactos em áreas de preservação permanente, como as margens de rios (MAIDMENT, 2002). De forma complementar, as geotecnologias para modelagem hidrológica são estratégicas para definir áreas propícias à

inundação (CORREA et al., 2015), áreas agrícolas que podem sofrer processos erosivos graves, como é o caso da área de análise com presença de pastagem e sem a devida manutenção e estruturação de curvas de nível.

A presente pesquisa demonstra que o uso de ferramentas hidrológicas utilizando produtos derivados de uma aeronave remotamente pilotada de baixo custo (em média US\$ 2.500,00), que gera dados de fluxo acumulado, é eficiente para o estudo de processos erosivos.

Para uma fotointerpretação complementar dos processos erosivos, houve a geração, além do MDE, de um ortomosaico de fotos sobrepondo no mesmo as curvas de nível e o fluxo acumulado (Figura 4).

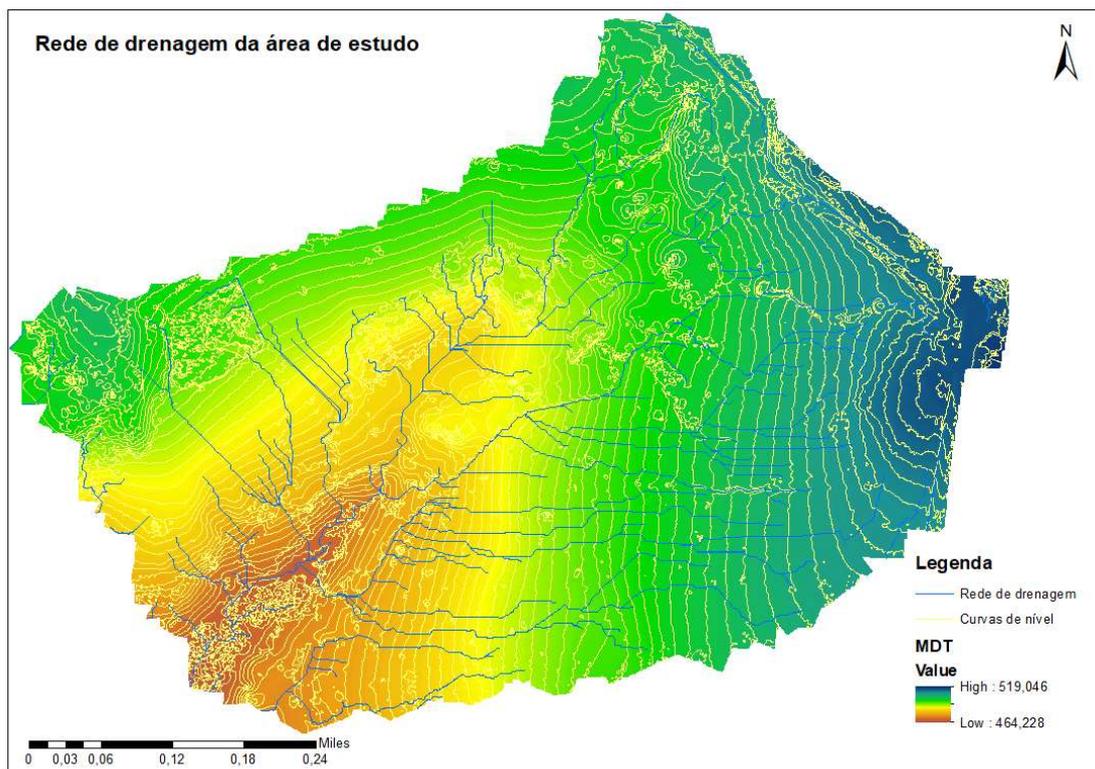


Figura 3. Mapa da área de estudo contendo o Modelo Digital de Elevação (MDE), as curvas de nível e o fluxo acumulado de água.
Figure 3. Map study area containing the Digital Elevation Model (DEM), contour lines and accumulated water flow.

Processos erosivos são fenômenos naturais, que ocorrem a partir do transporte e sedimentação do próprio solo. A ação antrópica, porém, pode intensificar tal processo ou mesmo causá-lo devido à utilização incorreta deste recurso, quando, por exemplo, ocorre a supressão da vegetação em terreno com declividade acentuada (PESSI; LOVERDE-OLIVEIRA, 2019)

É possível observar que o fluxo acumulado de água se sobrepõe aos processos erosivos como era esperado (Figura 3), pois, segundo Nardi et. al. (2008), a direção de fluxo simula o caminho que a água e os sedimentos percorrem através da topografia da área de estudo, e esse processo associado a declividade do terreno, aos tipos de usos da terra e a intensidade pluviométrica, caracterizam-se como os principais fatores condicionantes dos processos erosivos. Os demais fatores estão relacionados aos processos de erosão de maneira indireta, mas que contribuem para a suscetibilidade do terreno. O mapa de fluxo de drenagem do terreno mostra

a ocorrência de erosão e escorregamentos (movimentos de massas) (Figura 4) mostra que as áreas da região mais baixa próximas do corpo hídrico presente na parte de maior depressão da área analisada, são mais suscetíveis a este tipo de processo, apresentando baixa densidade de vegetação com a presença da pastagem ainda mais sem o devido ajustamento de curvas de nível no terreno (PESSI; LOVERDE-OLIVEIRA, 2019).

O algoritmo Flow Accumulation do software ArcGis delimitou cada processo erosivo como uma rede de drenagem, pois os mesmos possuem diferentes profundidades, servindo como rede de captação e transporte de água e sedimentos. Observa-se que, as curvas de nível da área também foram sensíveis a esses processos, tendo em vista a profundidade diferente dos mesmos em relação ao terreno (Figura 4).

Quando sobreposto o fluxo acumulado sobre o MDE com as curvas de nível da área, torna-se possível a observação

da provável direção de crescimento de cada processo erosivo isoladamente, levando em conta até onde vai o fluxo acumulado e a variação de altitude do terreno. Pode-se entender que, em geral, o perfil de crescimento desses processos se dará do ponto mais alto para o ponto mais baixo, tendendo a direção do maior fluxo de água encontrado na parte mais baixa da superfície.

Para confirmar esse perfil de crescimento, foram obtidas imagens da mesma área em abril de 2016 por meio da plataforma Google Earth, sendo possível identificar como eram esses processos erosivos antes da data do imageamento realizado em novembro de 2018.

Alguns processos erosivos da área de estudo foram analisados de maneira isolada e serão expostos nas Figuras 5, 6, e 7.

Observa-se que é possível traçar um perfil de crescimento dos processos erosivos a partir do perfil de escoamento da água, concluindo que, ferramentas hidrológicas possuem aplicabilidade no estudo desses processos.

Na Tabela 2 está ilustrado a quantidade de processos erosivos identificados na análise e a mensuração da área desses processos. Na Figura 8 está a localização dos processos erosivos.

Tabela 2. Área em metros quadrados de cada um dos processos erosivos encontrados na área de estudo e o seu tipo classificatório. Table 2. Area in square meters of each of the erosion processes found in the study area and their classification type.

Processos Erosivos	Área em m ²	Tipo de Processo Erosivo
01	2.137,91	Linear do tipo voçoroca
02	1.531,12	Linear do tipo voçoroca
03	1.545,98	Linear do tipo ravina
04	109,94	Linear do tipo ravina
05	2.839,63	Linear do tipo ravina
06	994,33	Linear do tipo ravina
07	1.153,16	Linear do tipo ravina
Total	10.311,21	

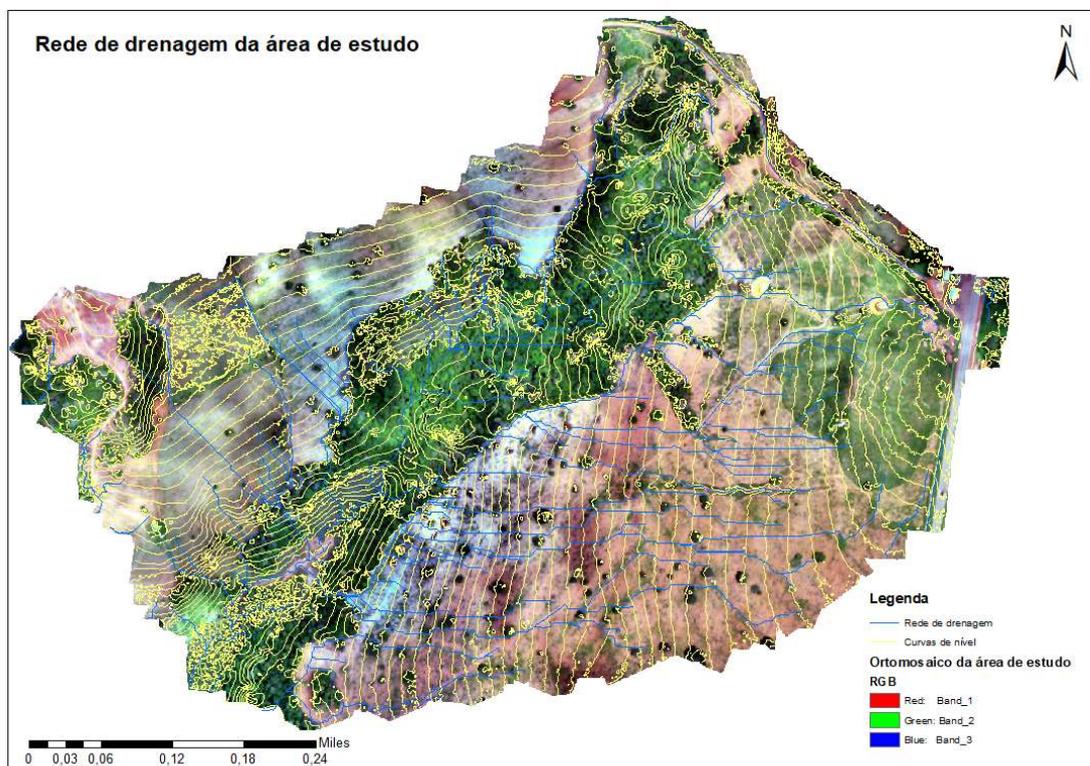


Figura 4. Carta-imagem da área de estudo contendo as curvas de nível e o fluxo acumulado de água.

Figure 4. Image chart of the study area containing the contour lines and the accumulated flow of water.

4. DISCUSSÃO

Para trabalhos futuros, sugere-se que cada processo erosivo seja individualizado e categorizado em termos de nível de criticidade, em função de variáveis determinantes para o agravamento do problema, tais como declividade do terreno, proximidade a corpo hídrico e principalmente nascentes, característica local do solo e grau de cobertura vegetal do solo, por exemplo. Esse cenário estabelecerá uma espécie de ranking de prioridade de intervenção das erosões, e se possível quais medidas mitigadoras seriam estratégicas para cada caso. Nesse protocolo operacional básico, deve-se incluir um monitoramento temporal por meio de imagens aéreas a serem coletadas principalmente nos períodos que

antecedem a estação chuvosa, para diminuir a probabilidade de evolução das erosões.

Vale destacar, que um bom indicador de efetividade na recuperação de erosões lineares como as identificadas, poderia ser a diminuição da extensão e da largura, algo que poderia ser facilmente mensurado com dados remotos suborbitais e pela rotina aqui apresentada. Por meio do uso de drone, constatou-se viabilidade temporal no monitoramento ambiental de processos erosivos, maior comodidade, segurança e eficiência na obtenção de informações da área de estudo, além de possibilitar grande precisão para a caracterização da forma e o tamanho de cada erosão. Portanto, fica clara a necessidade de implementar

medidas de manejo e contenção da erosão considerando toda a microbacia e não apenas propriedades rurais isoladas. Nesse contexto, o uso de imagens aéreas de alta resolução possibilita a identificação de pontos críticos em relação ao processo erosivo em microbacias hidrográficas. As limitações para a aplicação do uso de drone no monitoramento de processos erosivos estão relacionadas, principalmente, ao preço dos softwares de mapeamento. Devido à falta de concorrência dos softwares de processamento de imagens, os preços das assinaturas tornam-se exorbitantes, deixando usuário reféns de altos preços. Com a popularização dos drones, a tendência é que os preços dos softwares sofram mudanças, tornando-se mais acessíveis.

Para o estudo de ambientes ativos e dinâmicos, como ravinas, onde a variações na superfície do solo são da ordem de centímetros e metros, uma precisão milimétrica neste tipo de levantamento é muito importante, pois permite a avaliação de todos os tipos de erosão que ocorrem na área, desde a erosão laminar até grandes movimentos de massa (CÂNDIDO, 2019), o que pode ser facilmente aplicável com o uso de drone onde a precisão do levantamento é na escala de centímetros.

O uso de drones para aquisição de imagens aéreas representa um custo acessível e preciso como fonte de dados para ambientes com presença de erosão, seja locais em recuperação como áreas degradadas, ou ambientes agrícolas. O processamento fotogramétrico permitiu a geração de uma nuvem de pontos densa e ortoimagem, e a partir disso a

geração do MDE a uma distância de amostragem muito alta para toda a área de interesse, o que é consistente com estudos recentes (YAQIU et al., 2020; REN et al., 2019; PADRÓ et al., 2022). A metodologia utilizada para estimar os pixels correspondentes a canais de erosão em bacias hidrográficas, de acordo com um método previamente testado e implementado em análise morfométrica em outro estudo (WOOD, 2009; CÂNDIDO, 2019) e hidrológica (FAIRFIELD; LEYMARIE, 1991; HUPY; WILSON, 2021), foi aplicado nesta pesquisa com sucesso em imagens de drones, e nos permitiu construir uma estimativa com o MDE usando os pontos da nuvem densa localizada sobre a área estudada. A erosão estimada foi calculada aplicando a técnica de mensuração dos canais de erosão através do MDE no QGIS. O produto raster deste processamento foi obtido com software GIS, que é amplamente utilizado para análise morfométrica e de balanço hídrico, assim como as capacidades analíticas dos algoritmos implementado em Modelos Digital de Elevação e com imagens que podem produzir resultados com detalhes muito altos (PADRO et al., 2022).

Por fim, consideramos que a metodologia implementada é robusta e facilmente replicável em outros cenários com condições geomorfológicas semelhantes, seja em áreas ou no âmbito de obras de infraestrutura onde a erosão hídrica pode ser um fator de avaliação. Além disso, a metodologia facilitaria a análise de risco de problemas causados pela erosão.

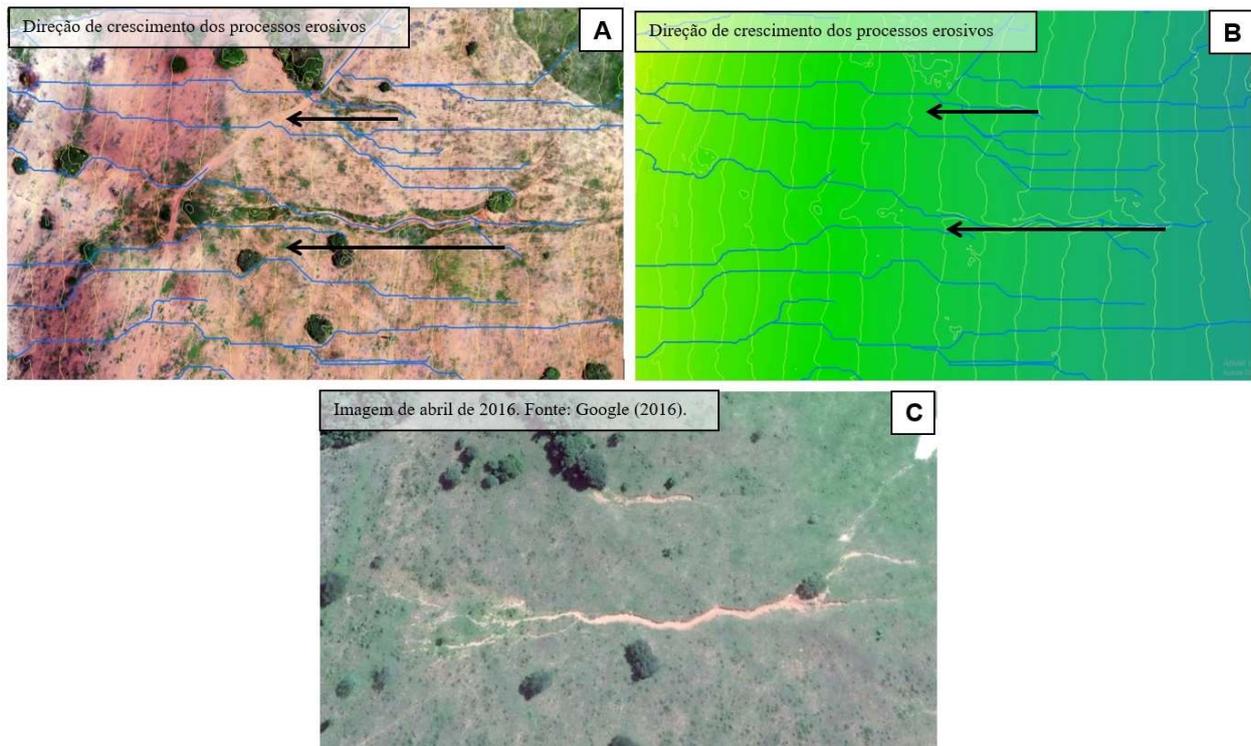


Figura 5. Direção de crescimento dos processos erosivos em destaque. Na imagem (a) é possível observar os processos erosivos no ortomosaico com as curvas de nível sobrepostas, na imagem (b) observa-se os mesmos produtos sobrepostos no MDE, e a imagem (c) retrata a área em 29 de abril de 2016. A altitude aumenta da esquerda para a direita.

Figure 5. Direction of growth of the erosive processes highlighted. In image (a) it is possible to observe the erosive processes in the orthomosaic with the level curves superimposed, in image (b) the same products superimposed on the DEM are observed, and image (c) depicts the area on April 29, 2016. Altitude increases from left to right.

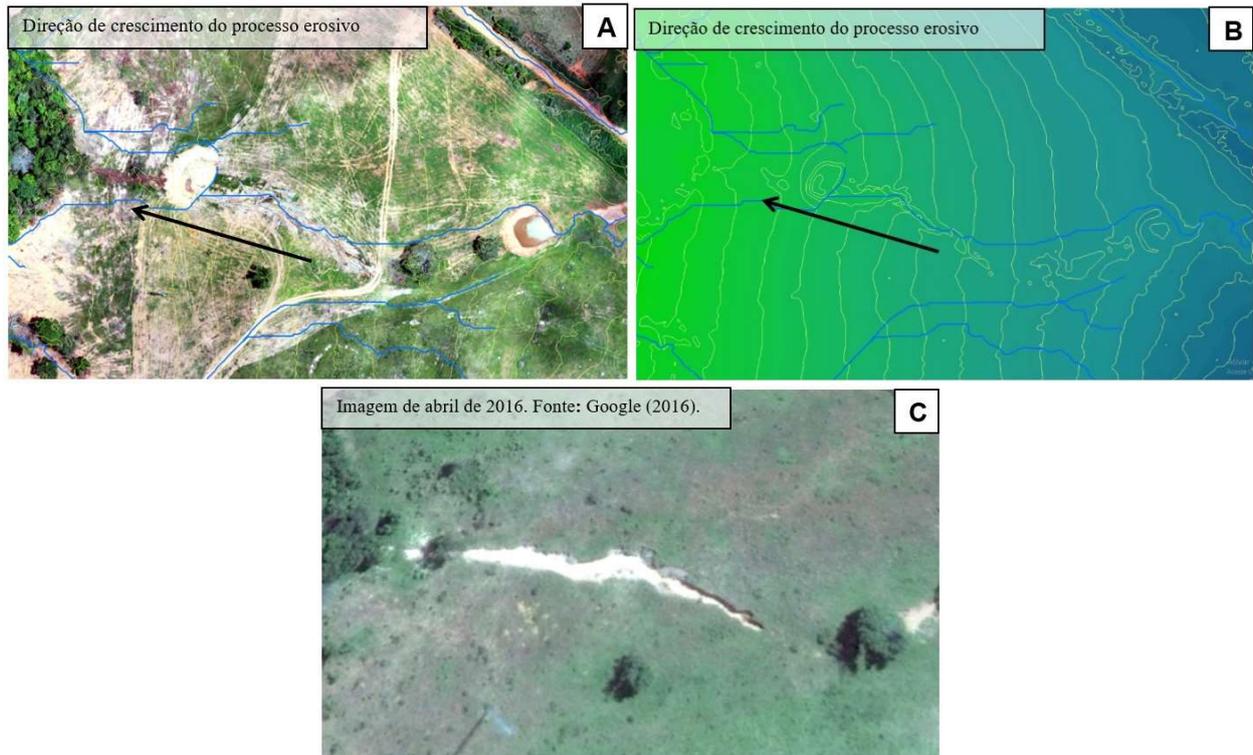


Figura 6. Direção de crescimento dos processos erosivos em destaque. Na imagem (a) é possível observar os processos erosivos no ortomosaico com as curvas de nível sobrepostas, na imagem (b) observa-se os mesmos produtos sobrepostos no MDT, e a imagem (c) retrata a área em 29 de abril de 2016. A altitude aumenta da esquerda para a direita.

Figure 6. Direction of growth of the erosive processes highlighted. In image (a) it is possible to observe the erosive processes in the orthomosaic with the level curves superimposed, in image (b) the same products superimposed on the MDT are observed, and image (c) depicts the area on April 29, 2016. Altitude increases from left to right.

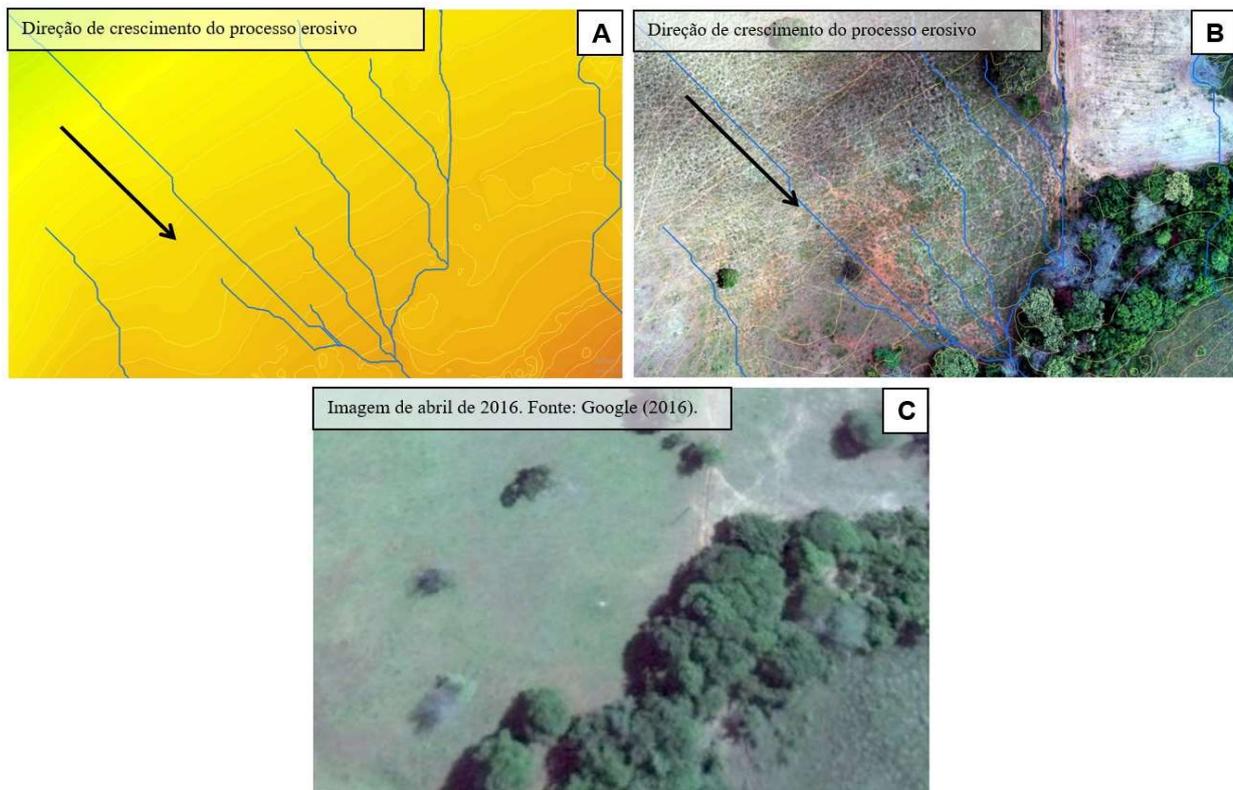


Figura 7. Direção de crescimento dos processos erosivos em destaque. Na imagem (a) é possível observar os processos erosivos no ortomosaico com as curvas de nível sobrepostas, na imagem (b) observa-se os mesmos produtos sobrepostos no MDE, e a imagem (c) retrata a área em 29 de abril de 2016. A maior altitude encontra-se na cor verde e a menor altitude encontra-se na cor laranja.

Figure 7. Direction of growth of the erosive processes highlighted. In image (a) it is possible to observe the erosive processes in the orthomosaic with the level curves superimposed, in image (b) the same products superimposed on the DEM are observed, and image (c) depicts the area on April 29, 2016. The highest altitude is shown in green and the lowest altitude is shown in orange.

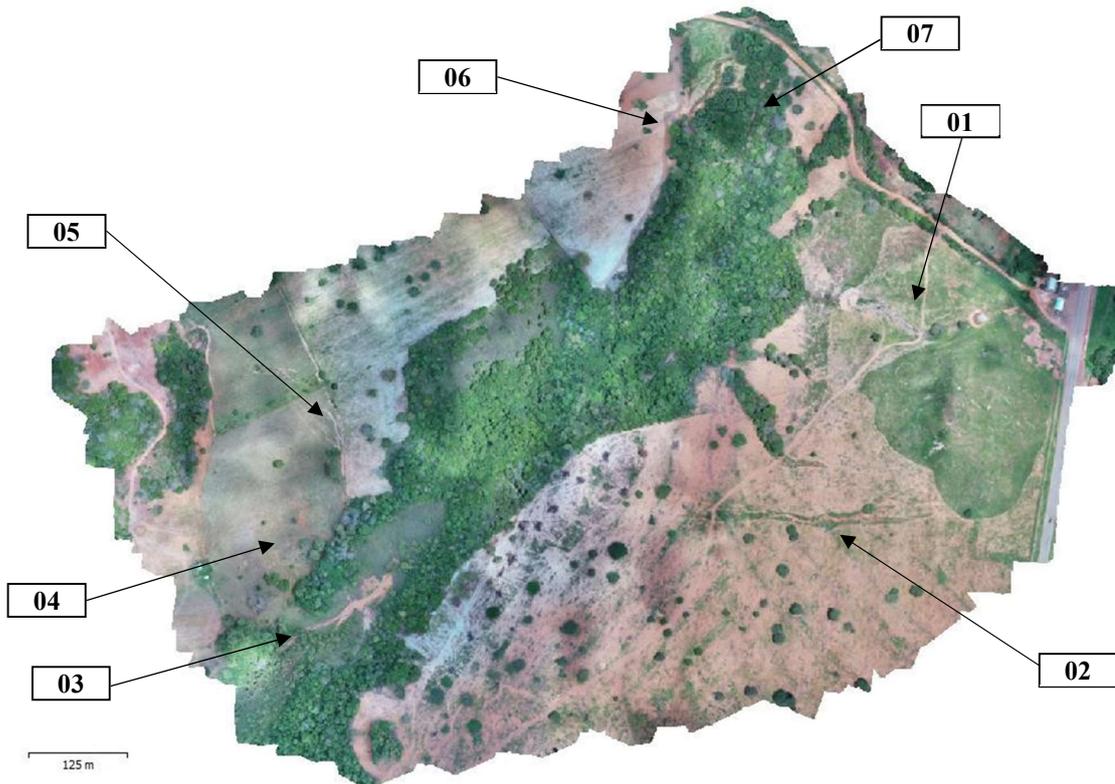


Figura 8. Processos erosivos elencados na análise e sua identificação numérica conforme informações descritas na Tabela 1.
 Figure 8. Erosive processes listed in the analysis and their numerical identification according to the information described in Table 1.

4. CONCLUSÕES

O Modelo Digital de Elevação – MDE com a rede de drenagem, obtida pelo fluxo acumulado, e as curvas de nível da área sobrepostas demonstraram-se efetivos para observar o perfil de evolução dos processos erosivos.

A aplicação das ferramentas de hidrologia no processamento do MDE evidenciou os processos erosivos da área, classificando-os como rede de drenagem, tendo em vista que os mesmos são formados a partir do transporte de água e sedimentos.

A junção desses produtos favorece uma análise individual de cada processo erosivo, facilitando assim o planejamento de medidas mitigadoras pontuais para os mesmos, como por exemplo as localidades e direção da construção de terraços.

A tecnologia de aeronaves remotamente pilotadas (drone) é altamente rentável, flexível e móvel, além do processamento fotogramétrico totalmente automatizado por vias de softwares pré-programados antes do voo da aeronave, pode ser implantado com baixíssimo custo para o uso operacional, e de fato o equipamento utilizado nesse trabalho foi um dos drones mais populares no mercado e baratos, facilitando replicar essa metodologia em outros lugares e difundir essa funcionalidade para a identificação e controle de erosões em áreas agrícolas de pastagem e em áreas próximas de áreas de preservação. O método aqui usado pode ser um POS – Procedimento Operacional Simplificado, apresentando uma poderosa ferramenta na gestão de controle de erosões e também na gestão de recursos naturais.

6. AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação em Gestão e Tecnologias Ambientais (PGTA) da Universidade Federal de Rondonópolis (UFR), e ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais (PPGTA) da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS).

Ao CNPq pelo apoio financeiro (Processos 441975/2018-6 - Edital Prev-fogo e 315170/2018-2 - Bolsa Produtividade DT e EI);

Ao Ministério Público de MT, pelo apoio financeiro (Projeto Prorad) e UFR, pelo apoio logístico e financeiro. Agradece novamente ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de produtividade em pesquisa concedida a A. C. Paranhos Filho (Processo CNPq 305013/2018-1).

Agradecemos ainda à CAPES por nos fornecer acesso ao Portal de Periódicos. Gostaríamos também de agradecer à CAPES pela bolsa de doutorado concedida ao Dhonatan Diego Pessi (processo número 88887.494036/2020-00).

Agradecemos ao Laboratório de Geomática e Estatística do Departamento de Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Rondônia por fornecer recursos humanos que colaboraram com a execução do trabalho.

7. REFERENCIAS

ANDRADE, R. G.; BOLFE, E. L.; VICTORIA, D. C.; NOGUEIRA, S. F. Geotecnologia - Recuperação de pastagens no Cerrado. *Agroanalysis*, v. 36, p. 30-33, 2016. DOI: <https://doi.org/10.21206/rbas.v7i1.376>

- CÂNDIDO, B. M. **use of ground and air-based photogrammetry for soil erosion assessment**. 1323p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Lavras, 2019.
- COLMAN, C. B.; OLIVEIRA, P. T. S.; ALMAGRO, A.; SOARES-FILHO, B. S.; RODRIGUES, D. B. Effects of climate and land-cover changes on soil erosion in Brazilian Pantanal. **Sustainability**, v. 11, n. 24, e7053, 2019. DOI: 10.3390/su11247053
- CORREA, E. F. G.; RIBEIRO, G. P.; BAPTISTA, A. C.; Modelagem hidrográfica da bacia hidrográfica do rio Bengalas, Nova Friburgo, RJ, utilizando o potencial de geotecnologias na definição de áreas de risco de inundação. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 67, p. 1183-1202, 2015.
- DroneDeploy (Versão 3.3.0) (Programa). (2018). Disponível em: <https://www.dronedeploy.com/>
- FAIRFIELD, J.; LEYMARIE, P. Drainage Networks from Grid Digital Elevation Models. **Water Resources**, v. 27, p. 709-717, 1991. DOI: <https://doi.org/10.1029/90WR02658>
- Google Earth version. (2016). **Your Map Title or geographic location**. Coordinates, Eye alt. Layer titles. Imagery attributions. <http://www.google.com/earth/index.html>. Acessado em: 23 de setembro de 2019.
- IBGE_Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Agropecuário 2017**. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pesquisa/24/76693> >. Acesso em 19 de fev. de 2020.
- IBGE_Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Panorama do município de Rondonópolis-MT**. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mt/rondonopolis/panorama>>.
- INACIO, E. S. B.; CANTALICE, I. J. R. B.; NACIF, P. G. S.; ARAUJO, Q. R. A.; BARRETO, A. C. B. Quantificação da erosão em pastagens com diferentes declives na Bacia do Ribeirão Salomea. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, n. 4, p. 355-360, 2007.
- LUEDELING, E.; SIEBERT, S.; BUERKERT, A. Filling the voids in the SRTM elevation model - A TIN-based delta surface approach. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, v. 62, n. 4, p. 283-294, 2007. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2007.05.004
- MENDES, C. A. B.; CIRILO, J. A. **Geoprocessamento em recursos hídricos: princípios, integração e aplicação**. Porto Alegre: ABRH, 2001. 536p.
- MAIDMENT, D. R. **Archydro: Gis for Water Resources**. [s.l.] ESRI, Incorporated, 2002. 203p. [https://www.scirp.org/\(S\(czeh2tfqyw2orz553k1w0r45\)\)/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=2032339](https://www.scirp.org/(S(czeh2tfqyw2orz553k1w0r45))/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=2032339)
- MORAES, J. M. Propriedades físicas dos solos na parametrização de um modelo hidrológico. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 8, n. 1, p. 61-70, 2003.
- NARDI, F.; GRIMALDI, S.; SANTINI, M.; PETROSELLI, A.; UBERTINI, L. Hydrogeomorphic properties of simulated drainage patterns using digital elevation models: the flat area issue. **Hydrological Sciences Journal**, v. 53, n. 6, p. 1176-1193, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1623/hysj.53.6.1176>
- PADRÓ, J. C.; CARDOZO, J.; MONTERO, P.; RUIZ-CARULLA, R.; ALCANIZ, J. M.; SERRA, D.; CARABASSA, V. Drone-Based identification of erosive processes in open-pit mining restored areas. **Land**, v. 11, p. 212, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/land11020212>
- PERON, A. J.; EVANGELISTA, A. R. Degradação de pastagens em regiões do cerrado. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 28, n. 3, p. 655-661, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-70542004000300023>
- PESSI, D. D.; JOSÉ, J. V.; MIOTO, C. L.; DIODATO, M. A.; GRIGIO, A. M.; PARANHOS FILHO, A. C.; SILVA, N. M. da. Estimando a Altura de Gramíneas Invasoras com Imagens de Veículo Aéreo não Tripulado no Cerrado Brasileiro: Precisão do Sistema Global de Navegação por Satélite do Phantom 4. **Revista de Geociências do Nordeste**, v. 7, n. 2, p. 140-152, 2021. DOI: [doi:10.21680/2447-3359.2021v7n2ID20423](https://doi.org/10.21680/2447-3359.2021v7n2ID20423).
- PESSI, D. D.; LOVERDE-OLIVEIRA, S. M. Aplicação da análise geoespacial para caracterização da fragilidade de terrenos. **Revista de Geografia**, v. 36, n. 1, p. 243-260, 2019. DOI: <https://doi.org/10.51359/2238-6211.2019.238451>.
- PERREIRA, M. A.; SILVA, N. M.; BARBOSA, D. S.; PESSI, D. D.; SOUZA, A. P.; PARANHOS FILHO, A. C. Identificação de sítios de reprodução de *Aedes aegypti* com aeronave remotamente pilotada (ARP). **Nativa**, v. 9, n. 4, p. 344-351, 2021. DOI: <https://doi.org/10.31413/nativa.v9i4.12094>
- REN, H.; ZHAO, Y.; XIAO, W.; HU, Z. A review of UAV monitoring in mining areas: Current status and future perspectives. **International Journal of Coal Science & Technology**, v. 6, p. 320-333, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40789-019-00264-5>
- WANG, X.; ZHAO, X.; ZHANG, Z.; YI, L.; ZUO, L.; WEN, Q.; LIU, F.; XU, J.; HU, S.; LIU, B. Assessment of soil erosion change and its relationships with land use/cover change in China from the end of the 1980s to 2010. **Catena**, v. 137, p. 256-268, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2015.10.004>
- WOOD, J. **Geomorphometry in LandSerf. In Geomorphometry: Concepts, Software, Applications. Developments in Soil Science**. In: HENGL, T.; REUTER, H. I. (Eds.). Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, v. 33, p. 333-34, 2009. <https://www.elsevier.com/books/geomorphometry/hengl/978-0-12-374345-9>
- YAQIU, Y.; CUNHAO, J.; JING, L.; JIE, W.; XING, J.; HAO, W.; YU, X.; LUSHOU, Z. Mining Ground Surface Information Extraction and Topographic Analysis Using UAV Video Data. In: **Proceedings of the E3S Web of Conferences**, v. 194, e05030, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1051/e3sconf/202019405030>