



Revista Cerrados (Unimontes)
ISSN: 1678-8346
ISSN: 2448-2692
revista.cerrados@unimontes.br
Universidade Estadual de Montes Claros
Brasil

Susceptibilidade a erosão do solo na bacia hidrográfica do córrego Bandeira, Campo Grande – MS

Baloque, Givanildo Ferreira; Capoane, Viviane

Susceptibilidade a erosão do solo na bacia hidrográfica do córrego Bandeira, Campo Grande – MS

Revista Cerrados (Unimontes), vol. 19, núm. 02, 2021

Universidade Estadual de Montes Claros, Brasil

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=576968366008>

DOI: <https://doi.org/10.46551/rc24482692202124>

Susceptibilidade a erosão do solo na bacia hidrográfica do córrego Bandeira, Campo Grande – MS

Soil erosion susceptibility in Bandeira watershed, Campo Grande – MS

Susceptibilidad a la erosión del suelo en la cuenca Bandeira, Campo Grande – MS

Givanildo Ferreira Baloque givanildobaloque@hotmail.com
Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul – UEMS, Campo Grande (MS), Brasil, Brasil

 <https://orcid.org/0000-0002-7439-0975>

Viviane Capoane capoane@gmail.com

Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul – UEMS, Campo Grande (MS), Brasil, Brasil

 <https://orcid.org/0000-0002-6672-1279>

Revista Cerrados (Unimontes), vol. 19,
núm. 02, 2021

Universidade Estadual de Montes Claros,
Brasil

Recepción: 04 Febrero 2021

Aprobación: 05 Julio 2021

Publicación: 01 Agosto 2021

DOI: [https://doi.org/10.46551/
rc24482692202124](https://doi.org/10.46551/rc24482692202124)

Redalyc: [https://www.redalyc.org/
articulo.oa?id=576968366008](https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=576968366008)

Resumo: A urbanização acelerada, desordenada e sem planejamento de Campo Grande a partir da década de 1960 resultou em alterações nos processos hidrológicos e geomórficos, impactando os ambientes terrestres (erosão) e aquáticos (sedimentação). Este trabalho teve como objetivo mapear os locais suscetíveis à erosão do solo na bacia hidrográfica do córrego Bandeira, visando gerar informações que subsidiem os gestores na tomada de decisão. Para investigar como a urbanização influencia na erosão hídrica, foram derivados de um Modelo Digital de Elevação de alta resolução espacial os atributos topográficos Declividade, Índice Topográfico de Umidade, Índice Topográfico de Capacidade de Transporte de Sedimentos e Índice Topográfico de Potência de Escoamento; e uso e cobertura da terra classificado a partir do NDVI de uma imagem Sentinel-2A. Os programas utilizados foram: ArcGIS 10.8.1, SAGA GIS 7.7.0 e SNAP 8.0. A álgebra de mapas resultou em cinco classes de susceptibilidade à erosão: a classe Muito Baixa corresponde a 10,63%, a classe Baixa 33,85%, Média 45,82%, Alta 8,03% e Muito Alta a 1,68% da área da bacia hidrográfica. As principais fontes de sedimentos são as vias sem pavimentação e com sistema de drenagem pluvial inexistente; áreas com vazios urbanos; terraplanagens; e erosão das margens de rios. Os reservatórios são os principais drenos de sedimentos da bacia hidrográfica.

Palavras-chave: Álgebra de mapas, Impactos da urbanização, Uso e cobertura da terra, Atributos do terreno.

Abstract: The accelerated, disorderly, and unplanned urbanization of Campo Grande, since the 1960s, resulted in changes in hydrological and geomorphic processes, impacting terrestrial (erosion) and aquatic (sedimentation) environments. This work aimed to map the locations susceptible to soil erosion of the Bandeira watershed using map algebra, aiming to generate information that aid in environmental management decisions. To investigate how urbanization influences water erosion, topographic attributes Slope, Topographic Wetness Index, Topographic Sediment Transport Capacity Index and Stream Power Index were derived from a digital elevation model (DEM) with high spatial resolution; and land use and land cover classified from the NDVI of a Sentinel-2A image. The software employed were ArcGIS 10.8.1, SAGA GIS 7.7.0 and SNAP 8.0. Map algebra gave five susceptibility soil erosion classes: Very Low class corresponded to 10.63% of the watershed area, Low class, 33.85%, Medium Class, 45.82%, High class, 8.03% and Very High class, 1.68%. The main sources of sediment

were unpaved roads with inexistent rainwater drainage systems; areas with urban voids; earthworks; and bank erosion. Reservoirs are the main sediment sink in the watershed.

Keywords: Map algebra, Urbanization impacts, Land use and land cover, Terrain attributes.

Resumen: La urbanización acelerada, desordenada y no planificada de Campo Grande desde la década de 1960 resultó en cambios en los procesos hidrológicos y geomórficos, impactando los ambientes terrestres (erosión) y acuáticos (sedimentación). Este trabajo tuvo como objetivo mapear las ubicaciones susceptibles de erosión del suelo en la cuenca Bandeira, con el fin de generar información para apoyar a los gestores en la toma de decisiones. Para investigar cómo la urbanización influye en la erosión hídrica, los atributos topográficos Declive, Índice de Humedad Topográfica, Índice Topográfico de Capacidad de Transporte de Sedimentos e Índice Topográfico de Escorrentía se derivaron de un MDE de alta resolución espacial; y uso del suelo y cobertura del suelo fue clasificados a partir del NDVI de una imagen Sentinel-2A. Los programas utilizados fueron: ArcGIS 10.8.1, SAGA GIS 7.7.0 y SNAP 8.0. El álgebra de mapas resultó en cinco clases de susceptibilidad a la erosión: la clase Muy baja corresponde a 10,63%, la clase Baja 33,85%, Media 45,82%, Alta 8,03% y Muy alta a 1,68 % del área de la cuenca. Las principales fuentes de sedimentos son caminos sin pavimentar con un sistema de drenaje pluvial inexistente; áreas con vacíos urbanos; movimiento de tierras; y erosión de márgenes. Los embalses son los principales sumideros de sedimentos en la cuenca.

Palabras clave: Álgebra de mapas, Impactos de la urbanización, Uso y cobertura, Atributos del terreno.

Introdução

Durante a maior parte da história humana, a população mundial viveu em pequenas comunidades, muitas estabelecidas em áreas de várzeas, pois as condições ecológicas e a localização geográfica ofereciam condições favoráveis para a organização cultural, desenvolvimento agrícola, comércio e crescimento econômico (DI BALDASSARRE, et al., 2010). Nos últimos séculos, e especialmente nas últimas décadas, a população mundial aumentou dramaticamente (RITCHIE; ROSEN, 2019). Segundo relatório da United Nations World Urbanization Prospects (UN, 2019), em 2018 a população mundial era de 7,63 bilhões e destes, 4,22 bilhões viviam em áreas urbanas, o que corresponde a mais da metade da população mundial. Se as projeções se confirmarem, todo o crescimento populacional mundial esperado entre 2018-2050 ocorrerá em áreas urbanas, ou seja, durante este período, a população urbana deverá aumentar em 2,5 bilhões de pessoas (de 4,2 bilhões para 6,7 bilhões), enquanto a população mundial total deverá crescer um pouco menos, 2,1 bilhões (de 7,6 bilhões em 2018 para 9,8 bilhões) (UN, 2019). O aumento da densidade populacional em áreas urbanas aumentará a pressão sobre os recursos naturais agravando ainda mais os impactos socioambientais.

No Brasil o processo de urbanização apresentou, em termos numéricos, pequenas alterações no quadro geral do seu crescimento entre o final do século XIX e as primeiras décadas do século XX. Conforme dados dos Censos Demográficos (IBGE, 1872; 1890; 1900, 1920; 1940; 1950; 1960; 1970; 1980; 1991; 2000; 2010), em 1872 a população total era de 9.930.478 habitantes, e em 1940, 41.236.315 habitantes. Nesse período, embora a população urbana tenha aumentado significativamente, ainda era predominantemente rural (IBGE, 1872;

1940). A explosão demográfica brasileira ocorreu a partir da década de 1950 e, nas seis décadas seguintes a população passou de 51.944.397 habitantes para 190.755.799, o que corresponde a um aumento de 367,2% (IBGE, 1950; 2010). Para 2020 a estimativa é de uma população de 211.755.692 habitantes (BRASIL, 2020).

O predomínio da população rural brasileira se manteve até a década de 1960, perfazendo 54,9% do total. Já em 1970 a população urbana passou para 56,0%, e em 2010 para 84,4% (IBGE, 1960; 1970; 2010). Segundo relatório do Department of Economic and Social Affairs, Population Division (UN, 2019), em 2018 cerca de 87% dos 211 milhões de brasileiros residiam em assentamentos urbanos. Para 2050 as projeções indicam uma população de 215 milhões de habitantes e destes, 92,4% residirão em áreas urbanas (UN, 2019).

Comparada as demais regiões brasileiras onde a ação urbanizadora do sistema colonial português deu um caráter urbano antes mesmo do rural (OLIVEIRA, 1982), na região Norte e Centro-Oeste a urbanização foi tardia, consistindo em regiões de expansão da fronteira agrícola dirigida pelo Estado (GODOY; BRAY, 2003). O Centro-Oeste era, nas décadas de 1940, 1950 e 1960, a região menos urbanizada do país e, a partir da década de 1970 passa para o segundo lugar na classificação (SANTOS, 1993). Essa urbanização rápida está associada a agricultura altamente mecanizada – voltada a produção de commodities para à exportação - provocou uma forte liberação da mão-de-obra do campo. O processo de urbanização acelerado também ocorreu paralelamente ao aumento da população, o que agravou os impactos socioeconômicos e ambientais, como ocupações e construções irregulares em margens de rios e nascentes, a compra de terrenos em loteamentos irregulares, a formação de bolsões de pobreza espalhados pela cidade, erosões, enchentes, inundações, alagamentos, assoreamento de rios e reservatórios, contaminação das águas, dentre outros.

Campo Grande, capital do estado de Mato Grosso do Sul, onde está inserida a área de estudo do presente trabalho, cresceu cerca de 500 ha/ano na década de 1960 e em razão disso, o perímetro urbano da cidade foi ampliado três vezes (WEINGARTNER, 2001). Nas décadas seguintes a população do município aumentou para 143.271 (1970), 298.878 (1980), 525.463 (1990), 662.534 (2000) e, 786.797 habitantes em 2010, sendo que no último Censo Demográfico, 98,7% da população do município residia no perímetro urbano (IBGE, 1970, 1980, 1990, 2000, 2010). Para 2020, a população estimada de Campo Grande é de 906.092 habitantes.

Em função do crescimento acelerado da cidade de Campo Grande, em 1965 foi implementado o segundo Código de Obras, Lei n. 26 (PMCG, 1965), que conforme Weingartner (2001), tinha como princípio o urbanismo modernista (habitação, trabalho, lazer e circulação). Entretanto, segundo este autor, a lei facultava que áreas úmidas e pequenos cursos d'água pudessem ser drenados e aterrados para que se procedesse o parcelamento e a ocupação do solo, o que demonstra que a proteção dos recursos naturais não era plena. Na Lei n. 1.866 (CAMPO

GRANDE, 1980), que instituiu o atual Código de Obras do município, o artigo 190, que trata dos conjuntos residenciais, ainda consta que “em conjuntos residenciais o terreno será convenientemente drenado”.

Ao longo das últimas décadas, inúmeros dispositivos legais foram criados e aperfeiçoados visando o ordenamento territorial e a diminuição dos impactos socioambientais na cidade de Campo Grande. No entanto, muitos dos impactos ambientais decorrentes da urbanização acelerada a partir da década 1960 como: a impermeabilização do solo que acelerou os processos geomórficos superficiais; a implantação de loteamentos em fundos de vale e em área de preservação permanente de córregos e nascentes; e em locais sem infraestrutura necessária, principalmente no que se refere às vias pavimentadas, drenagem pluvial e esgotamento sanitário, persistem ou foram intensificados. Esse cenário de degradação mostra que, embora os assentamentos humanos e os métodos subsequentes de produção e uso da terra tenham mudado em composição e forma ao longo do tempo, eles aumentaram em tamanho e impacto ecológico (DI BALDASSARRE, et al., 2013).

Assim como ocorre na maioria das cidades onde o crescimento se deu de forma desordenada, sem planejamento, e que as medidas tomadas pelos gestores ao longo do tempo foram no sentido de mitigar os impactos e não resolvê-los, a bacia hidrográfica do córrego Bandeira, inserida no perímetro urbano de Campo Grande, sofreu mudanças ambientais drásticas, e a produção de sedimentos e os problemas deles advindos representam atualmente um grande desafio para o gerenciamento dos recursos hídricos. Diante do exposto, este trabalho tem como objetivo mapear os locais susceptíveis à erosão hídrica na bacia hidrográfica do córrego Bandeira por álgebra de mapas, visando gerar informações que subsidiem os gestores na tomada de decisão.

Localização e caracterização da área de estudo

A bacia hidrográfica (BH) do córrego Bandeira está localizada na porção sudeste do perímetro urbano de Campo Grande - MS (Figura 1), inserida nos bairros: Vilas Boas, TV Morena, Progresso, Piratininga, Colonial, Universitário, Rita Vieira, América, Dr. Albuquerque, UFMS e Carlota (CAMPO GRANDE, 2015).

O clima da região, segundo a classificação de Köppen, situa-se na faixa de transição entre o sub-tipo Cfa – mesotérmico úmido sem estiagem – em que a temperatura do mês mais quente é superior a 22°C e o sub-tipo Aw – tropical úmido com estação chuvosa no verão e seca no inverno (MOTTA, et al., 2013). A precipitação acumulada para o ano de 2020 foi de 1.2181,4 mm sendo fevereiro o mês mais chuvoso com 227,2 mm (INMET, Estação meteorológica - Latitude -20.45°; Longitude -54.616°).

A litologia da área (escala 1:20.000), conforme a Carta Geotécnica (SEPLAN, 1991), corresponde aos basaltos da Formação Serra Geral com arenitos intertrápicos (89,90%), e arenitos do Grupo Caiuá (1,95%). Nos fundos de vale encontram-se materiais aluvionares Holocénicos, que correspondem a 8,15% da área da bacia hidrográfica. Os solos

predominantes (escala 1:60.000) são os Latossolos (89,9%); Neossolos Quartzarênicos (1,95%); e solos hidromórficos (8,15%) (SEPLAN, 1991).

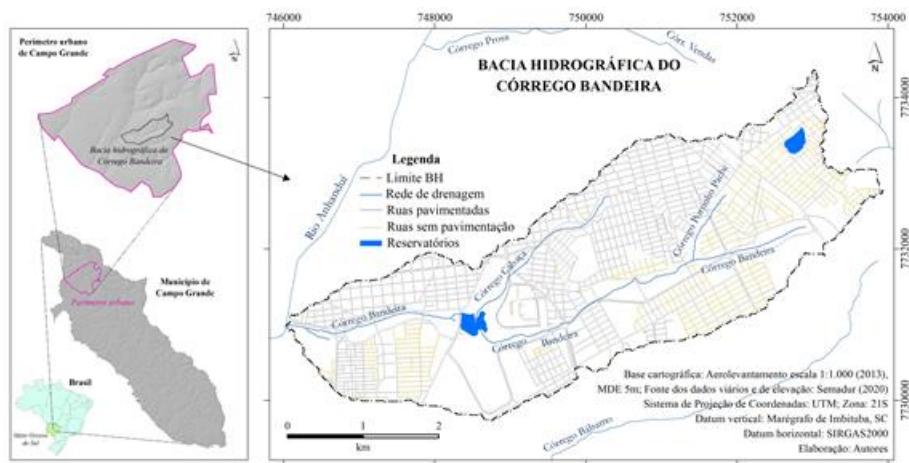


Figura 1

Localização da bacia hidrográfica do córrego Bandeira, Campo Grande – MS

Autores, 2021.

No contexto geomorfológico, Campo Grande encontra-se na macroforma de relevo dos Planaltos e Chapadas da Bacia do Paraná (ROSS, et al., 2019), na Unidade Geomorfológica Planalto Sul-Mato-Grossense (IBGE, 2019). No contexto hidrográfico regional, a área está inserida na bacia hidrográfica do Rio Pardo, que por sua vez é afluente do rio Paraná. A BH do córrego Bandeira situa-se na cabeira de drenagem do rio Anhanduí, afluente do rio Pardo, tendo como principais afluentes os córregos Cabaça e Portinho Pache (Figura 1).

A vegetação natural compõe a ecorregião do Cerrado, sendo o fragmento mais preservado a Reserva Particular do Patrimônio Natural (RPPN) inserida no Campus da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS) (IMASUL, 2003). A vegetação natural remanescente encontra-se fragmentada ao longo dos cursos d'água e o aspecto fitofisionômico natural encontra-se alterado, com presença de espécies invasoras como a Leucena (*Leucaena leucocephala*), que pressionam a vegetação natural.

Material e Métodos

Base cartográfica e delimitação da bacia hidrográfica

Os dados geoespaciais de referência utilizados no presente trabalho foram: a malha municipal do ano de 2018 disponibilizada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2018), e a malha viária, bairros e altimetria do município de Campo Grande, disponibilizada pela Secretaria Municipal de Meio Ambiente e Gestão Urbana. (SEMADUR)

Os dados altimétricos do perímetro urbano utilizados para a derivação de atributos topográficos e delimitação da bacia hidrográfica, são produto de um aerolevantamento (voo junho de 2013, faixa 13, 859 fotos)

na escala 1:1.000 (CAMPO GRANDE, 2013; SEMADUR, 2020). A equidistância entre as curvas de nível é de um metro e o número de pontos cotados é de 79.631.

Efetuado o download, em ambiente do Sistema de Informação Geográfica (SIG), no programa ArcGIS 10.8.1 (ESRI, 2020), foi definido o sistema de referência SIRGAS2000 e procedeu-se a interpolação das curvas de nível e pontos cotados para geração do Modelo Digital de Elevação (MDE). O interpolador utilizado foi o topo to raster. Optou-se por este interpolador, pois segundo Hutchinson (1989) e Hutchinson et al. (2011), resulta em melhor consistência hidrológica, criando uma superfície que representa mais de perto uma drenagem natural e preserva melhor as linhas de cume.

A fim de detectar a presença de artefatos, que são recursos erráticos distintos, sendo a maioria deles detectada em visualizações tridimensionais (REUTER; NELSON; JARVIS, 2009), foi derivado o relevo sombreado. A imagem gerada possibilitou identificar buracos e picos resultantes de pontos com cotas zero, negativas, inferiores e superiores aos valores entre duas curvas de nível. Na camada pontos cotados, os pontos identificados como buracos e picos foram excluídos. Uma nova interpolação foi executada e, uma vez que não foram mais visualizados artefatos, procedeu-se uma nova interpolação com tamanho de grade de saída de cinco metros. Esta resolução espacial permite a representação da topografia complexa de uma área urbanizada. Ressalta que, embora a resolução espacial de saída do MDE seja cinco metros, para a interpolação foram utilizadas as curvas de nível com equidistância de um metro.

Uma vez obtido o MDE, procedeu-se a delimitação da bacia hidrográfica. Para esta etapa é necessário que as depressões sejam removidas, pois elas interrompem a superfície de drenagem, o que impede o direcionamento dos fluxos sobre a superfície (direção do fluxo, acúmulo de fluxo e área de contribuição a montante), consequentemente a delimitação da BH. Para o preenchimento das depressões utilizou-se a função Fill e na sequência determinou-se a direção de fluxo (Flow Direction), acúmulo de fluxo (Flow Accumulation), Conditional, e por fim, a extração do limite utilizando a função de pontos (Watershed). O MDE com as depressões preenchidas (Fill) foi utilizado unicamente para a delimitação da BH, pois, conforme Lindsay e Creed (2005), o preenchimento de depressões em MDEs altera significativamente a distribuição espacial e a estatística dos atributos do terreno derivados.

Atributos topográficos primários e secundários

Os atributos topográficos derivados do MDE para mapeamento dos locais mais susceptíveis à erosão foram: Declividade (D), Índice Topográfico de Umidade (ITU), Índice Topográfico de Capacidade de Transporte de Sedimentos (ITCTS) e Índice Topográfico de Potência de Escoamento (ITPE).

O atributo topográfico primário declividade corresponde ao desnível topográfico (ou altura) entre dois pontos e a distância horizontal (ou base) entre eles (IBGE, 2009). Para Burrough (1986), refere-se à inclinação da superfície do terreno em relação ao plano horizontal, expresso como a mudança de elevação sobre certa distância. O declive do terreno influencia diretamente na velocidade dos fluxos superficiais e subsuperficiais, logo, no teor de água do solo e no potencial dos processos erosivos e deposicionais. Normalmente esse atributo é calculado em graus ou porcentagem. Para este trabalho a declividade foi derivada do MDE em percentagem, no programa ArcMap 10.8.1. O intervalo de classes utilizado foi o proposto por Lepsch et al. (2015). As duas últimas classes de declive (45-70 e > 70%) foram agrupadas na classe > 45% (Tabela 1).

Tabela 1
Classes de declividade, relevo e escoamento superficial

Declividade %	Classe de declive	Escoamento superficial
0 - 2	Plano ou quase plano	Muito lento ou lento
2 - 5	Inclinação suave	Lento ou médio
5 - 10	Moderadamente inclinada	Médio ou rápido
10 - 15	Muito inclinada	Rápido
15 - 45	Fortemente inclinada	Muito rápido
45 - 70	Íngreme montanhoso	Muito rápido

Lepsch et al. (2015).

Os atributos topográficos secundários envolvem combinações dos atributos primários e são índices que descrevem ou caracterizam a variabilidade espacial de processos específicos que ocorrem na paisagem (MOORE; GRAYSON; LADSON, 1991). Os atributos topográficos secundários utilizados no presente trabalho (ITU, ITCTS e ITPE) foram derivados do MDE no programa livre de código aberto SAGA GIS, v. 7.7.0 (CONRAD, et al., 2007).

O índice topográfico de umidade (Equação 1) foi desenvolvido por Beven e Kirkby (1979) e implementado no modelo hidrológico semi-distribuído Topography-based hydrological model – TOPMODEL (BEVEN, et al., 1984). Este índice relaciona a área da encosta acima como uma medida de água fluindo em direção a um certo ponto, com a encosta local, que é uma medida de transmissividade lateral subsuperficial, partindo do pressuposto que a topografia controla o movimento da água nas encostas. O ITU é puramente baseado na topografia sendo uma função da área de contribuição a montante e do declive, refletindo a distribuição espacial da umidade do solo, saturação da superfície e os processos de geração de escoamento (ZHANG; MONTGOMERY, 1994). O módulo do SAGA GIS utilizado foi o Terrain Analysis, Compound Analyses, Basic Terrain Analyses.

$$ITU = \ln\left(\frac{As}{\tan\beta}\right) \quad (\text{Equação 1})$$

Em que, As corresponde à área de contribuição específica por unidade de largura ortogonal à linha de fluxo ($m^2 m^{-1}$) e β é a declividade expressa em graus radianos. Este índice aplica a seguinte restrição: $0^\circ < \beta < 90^\circ$, pois se $\beta = 0$, $\tan \beta = 0$ e $1/\tan \beta$ é infinito e, se $\beta = 90^\circ$, $1/\tan 90^\circ = 0$, $\ln 0$ é infinito. O resultado dos dados na sua interpretação é que β próximo à zero a superfície é mais plana, consequentemente mais úmido é o solo.

O índice topográfico de capacidade de transporte de sedimentos (Equação 2) é baseado no fator topográfico (Length, Slope) da Universal Soil Loss Equation (USLE). O comprimento do declive é genericamente definido como a distância do ponto de origem do fluxo superficial até o ponto onde cada gradiente de declive (S) diminui o suficiente para o início da deposição ou, o fluxo passa a se concentrar num canal definido (WISCHMEIER; SMITH, 1978).

Em comparação com o fator LS, o ITCTS explica mais completamente a complexidade topográfica, considerando tanto a curvatura do perfil (na direção descendente) e a curvatura tangencial (perpendicular à direção de descida), pela inserção na equação da área de contribuição específica. O significado deste índice é que uma área com alta declividade e rampa alongada possui alto potencial para geração de escoamento superficial, logo, na erosão e no potencial de transporte de uma área em resposta às fortes chuvas (MINELLA; MERTEN; RUHOFF, 2010; POURGHASEMI, et al., 2013; VIJITH; DODGE-WAN, 2018).

O ITCTS foi derivado do MDE por meio da metodologia proposta por Moore e Burch (1986a, 1986b), com o módulo do SAGA GIS Terrain Analysis, Compound Analyses, Basic Terrain Analyses.

$$ITCTS = \left(\frac{As}{22,13} \right)^m \left(\frac{\tan \beta}{0,0896} \right)^n \quad (\text{Equação 2})$$

[Equação 2]

Em que, As corresponde à área de contribuição específica por unidade de largura ortogonal à linha de fluxo ($m^2 m^{-1}$) e β é a declividade expressa em graus radianos. Os expoentes m e n refletem a interação entre os diferentes tipos de fluxo, assim como o transporte e desprendimento de sedimentos. Como se trata de elevação de superfície, as restrições, nesse caso, são apenas da condição de existência de β , ou seja, $0^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$.

O índice topográfico de potência de escoamento (Equação 3) descreve o potencial da topografia para concentrar grandes quantidades de água superficial, promovendo o entalhe, ou seja, estima a capacidade dos fluxos superficiais potencialmente modificar a geomorfologia de uma área por meio de erosão e transporte em ravinas (WILSON; GALLANT, 2000; CHEN; YU, 2011; POURGHASEMI, et al., 2013). A medida do poder erosivo da água corrente considera a relação entre a área de contribuição a montante do fluxo acumulado e da declividade, com base no pressuposto de que o fluxo acumulado e declive é proporcional ao potencial de

arraste do sedimento. O módulo do SAGA utilizado foi Terrain Analysis, Hydrology, Stream Power Index.

$$ITPE = As \cdot \tan\beta$$

(Equação 3)

[Equação 3]

Em que, As corresponde à área de contribuição específica por unidade de largura ortogonal à linha de fluxo ($m^2 \text{ m}^{-1}$) e β é a declividade expressa em graus radianos.

Os atributos topográficos derivados de MDEs em ambiente do SIG são parâmetros importante para a gestão de recursos naturais. Suas aplicações abrangem inúmeros campos da ciência como: modelagem preditiva da vegetação (MOORE, et al., 1993; VAN NIEL; LAFFAN; LEES, 2004; RODRÍGUEZ-MORENO; BULLOCK, 2013; ECHIVERRI; MACDONALD, 2019); quantificação do controle topográfico em processos hidrológicos e localização de áreas saturadas na paisagem (BEVEN; WOOD; SIVAPALAN, 1988; SIVAPALAN; WOOD; BEVEN, 1990; MOORE, et al., 1993; RADUŁA; SZYMURA; SZYMURA, 2018); na modelagem da erosão do solo (CAPOANE, et al., 2015; SHANA; YANG; ZHU, 2019); na identificação dos caminhos de fluxo hidrológico para modelagem geoquímica (WELSCH, et al., 2001); no mapeamento da matéria orgânica do solo (PEI, et al., 2010; CAPOANE; SANTOS; KUPLICH, 2016); na caracterização de processos biológicos, como produção primária líquida anual (WHITE; RUNNING, 1994); no planejamento do uso do solo com base no risco de inundação (POURALI, et al., 2016); na determinação das áreas susceptíveis à movimentos de massa (YESILNACAR; TOPAL, 2005; CHEN, et al., 2017; ARABAMERI, et al., 2018); na classificação de elementos de relevo (IRVIN; VENTURA; SLATER, 1997), no mapeamento digital de solos (TEN CATEN, et al., 2012; SILVEIRA, et al., 2012); no mapeamento geomorfológico (COMERLATO; LAMOUR, SILVEIRA, 2020), dentre inúmeras outras aplicações.

Uso e cobertura da terra

O mapeamento do uso e cobertura da terra foi efetuado a partir do Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) no programa Sentinel Application Platform (SNAP), versão 8.0 (ESA, 2020), a partir de uma imagem do satélite óptico Sentinel-2, órbita relativa R024, nível de processamento 2A, com data de 09 de março de 2020. As imagens Sentinel são disponibilizadas gratuitamente pela European Space Agency (ESA), no Hub de Pré-Operações.

O NDVI foi proposto por Rouse et al. (1973), a partir da normalização do Índice de Vegetação da Razão Simples para o intervalo de -1 a +1. A normalização consiste em uma relação entre as medidas espectrais de

duas bandas do espectro eletromagnético, a do visível (vermelha) e a do infravermelho próximo.

Considerando que valores negativos de NDVI (próximos a -1) correspondem à água, valores próximos a zero correspondem a áreas de afloramento e solo exposto, areia; valores moderados representam arbustos e pastagens, culturas, enquanto os valores altos indicam vegetação mais densa, os valores obtidos foram classificados em cinco intervalos: Massas d'água, Área urbanizada, Vegetação herbácea, Vegetação florestal. Um dos intervalos foi editado, a fim de incluir a classe agricultura urbana - Horticultura.

Álgebra de mapas

A determinação dos locais mais susceptíveis à erosão do solo na bacia hidrográfica do córrego Bandeira foi realizada a partir da combinação linear dos atributos topográficos D, ITCTS, ITU e ITPE por álgebra de mapas, de modo a reduzir a complexidade da análise. As combinações visam à representação das unidades da paisagem mais propensas a perda de sedimento e água. Os elementos da álgebra consistem na associação de um valor quantitativo a cada área do mapa, neste caso a intervalos de classe, sendo que as operações aplicadas aos mesmos ficam a cargo do modelador (TOMLIN, 1994). A atribuição desse valor é essencial, pois é a partir dele que serão efetuados os cruzamentos. Essa operação torna a análise subjetiva refletindo à formação acadêmica do modelador (CÂMARA, 2005).

O uso e cobertura da terra não foi combinado por álgebra linear, pois a resolução espacial entre atributos topográficos e NDVI é diferente, cinco e dez metros. Uma vez executada a álgebra de mapas, foram integradas as classes de uso e cobertura da terra. A classe Horticultura foi considerada como de susceptibilidade a erosão Alta, Vegetação herbácea Média, Massas d'água Baixa e Vegetação Florestal Muito Baixa. A classe Área urbanizada, que é dominante em área na BH, não foi integrada, pois características do relevo que possibilitam a identificação dos locais que concentram os fluxos superficiais como as ruas, seriam perdidos.

Resultados

Atributos topográficos e NDVI

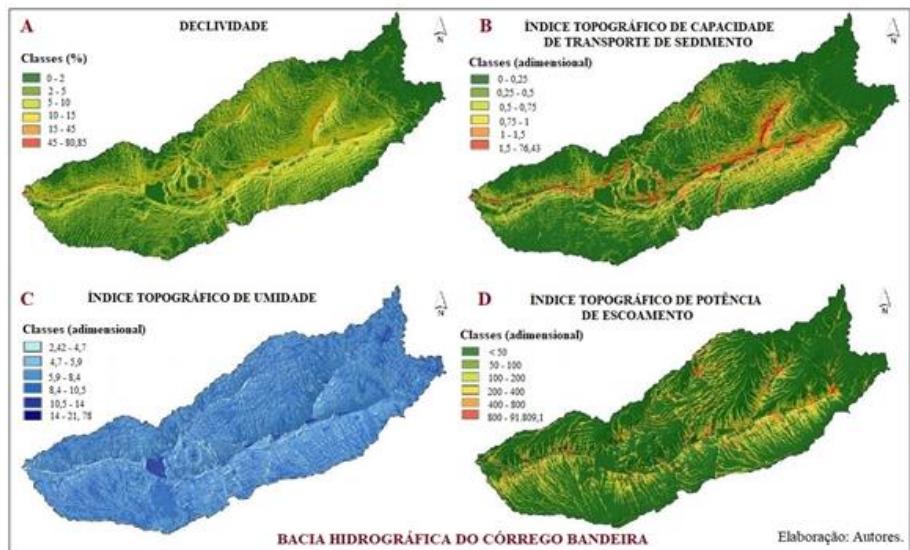
A amplitude topográfica, que corresponde a distância vertical entre o topo da vertente e o fundo do vale (HACK, 1960), da bacia hidrográfica do córrego Bandeira é 134,81 m, a área de drenagem é de 15,5 km² e o perímetro é de 28,13 km. Quanto a forma da BH, o fator forma (HORTON, 1932) é 0,24; a razão de elongação (SCHUMM, 1956) é de 0,55 e; a razão de circularidade (MILLER, 1953) é de 0,25, o significado hidrológico é que geometria é alongada, o que resulta em maior tempo de concentração e diminuição da tendência de haver picos de enchente. A hierarquia fluvial, que representa uma medida da extensão da ramificação

do fluxo dentro de uma bacia hidrográfica (STRAHLER, 1964), é de segunda ordem e o comprimento total dos canais é de 11,50 km.

A declividade do terreno variou de 0 a 80,86% com média de 3,71 e desvio padrão de 3,53. A classe mais representativa em área é a de declive Suave, com 43,41%, seguida da classe Plano ou quase plano, com 32,09%, Moderadamente inclinado com 19,14%, Muito inclinado com 3,74%, Fortemente inclinado com 1,60% e Montanhoso e Escarpado com 0,02% da área da BH (Figura 2A). As áreas de maior declive estão associadas ao entalhe dos canais de drenagem pelo acúmulo dos fluxos superficiais nos fundos de vale e ao relevo antropogênico como nos cortes em vertentes para abertura de vias e escavações para construção de obras de infraestrutura.

O índice topográfico de capacidade de transporte de sedimento (Figura 2B) variou de 0 a 76,4 com média de 0,23 e desvio padrão de 0,5. A classe mais representativa em área foi 0-0,25 com 55,13% da área da BH, seguida das classes: 0,25-0,5; 0,5-0,75; 0,75-1; 1-1,5 e; > 1,5 com 23,02; 9,62; 5,02; 4,25 e; 2,96% da área da bacia hidrográfica, respectivamente. O significado do ITCTS é que quanto maior o valor, maior será a energia dos fluxos superficiais, consequentemente, maior será o poder erosivo, aumentando assim a susceptibilidade a perda de sedimento e poluentes adsorvidos.

Os valores do índice topográfico de umidade (Figura 2C) variaram de 2,42 a 21,78 com média de 7,76 e desvio padrão de 1,78. A classe mais representativa em área foi 5,9-8,4 com 58,92% da área da BH, seguida das classes: 8,4-10,5; 4,7-5,9; 10,5-14; <4,7 e; > 14 com 24,16; 9,43; 5,35; 1,39 e; 0,74 % da área da bacia hidrográfica, respectivamente. Os maiores valores do ITU representam as áreas com maior potencial de saturação hídrica, ou seja, áreas com maior potencial de acúmulo de água e geração de escoamento superficial em eventos de chuva.

**Figura 2**

Classes de declividade (A); Índice topográfico de capacidade de transporte de sedimentos (B); Índice topográfico de umidade (C); Índice topográfico de potência de escoamento (D) para a bacia hidrográfica do córrego Bandeira
Autores, 2021.

O índice topográfico de potência de escoamento (Figura 2D) variou de 0 a 91.809,1 com média de 59,5 e desvio padrão de 741. A classe mais representativa em área foi a < 50 com 70,23% da área da BH, seguida das classes: 50-100; 100-200; 200-400; 400-800 e; > 800 com 11,04; 8,64; 5,37; 2,81 e; 1,93 % da área da bacia hidrográfica, respectivamente. Os maiores valores do ITPE indicam os caminhos de fluxo superficial preferencial durante tempestades ou chuvas erosivas severas, apontando para áreas potenciais para formação de ravinas.

O ITU e o ITPE (Figuras 2C e 2D) permitem uma melhor visualização da influência antrópica nos processos geomórficos superficiais (dinâmica hídrica e morfologia das vertentes). A partir do recorte espacial da Figura 3, observa-se que urbanização têm efeito significativo nos processos naturais que concentram e alteram os padrões de drenagem. Em eventos de chuva o escoamento superficial é favorecido devido a impermeabilização do solo e os fluxos superficiais são concentrados pelo sistema viário sendo redirecionados pelo sistema de drenagem pluvial até os rios. Nas vias não pavimentadas, onde o sistema de drenagem pluvial é inexistente, elas são transformadas em córregos em eventos de tempestade. A modificação dos processos hidrológicos nas vertentes aumenta o volume das águas superficiais em forma de enxurradas que arrastam materiais tecnogênicos (lixo, entulho, plástico, etc., além dos sedimentos e poluentes adsorvidos e matéria orgânica) até os corpos d'água. Nos canais de drenagem, o aumento significativo da vazão em eventos de chuva potencializa a erosão das margens.

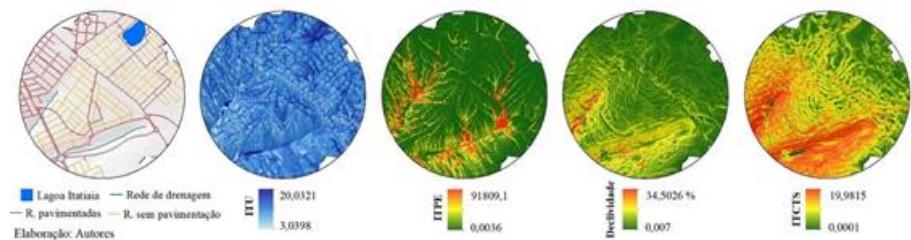


Figura 3

Recorte espacial para as cabeceiras de drenagem dos córregos Bandeira e Portinho Pache
Autores, 2021.

Os valores de NDVI variaram de -0,38 a 0,92 com média de 0,38 e desvio padrão de 0,24 (Figura 4A). Os menores valores correspondem aos corpos d'água, área construída e solo exposto, que tem comportamento espectral semelhante a água. Os maiores valores correspondem a vegetação florestal. A classificação em cinco intervalos de classe (Figura 4B) visou representar os diferentes tipos de cobertura do solo. A classe Área urbanizada é a mais representativa em área com 65,95%, seguida de Vegetação herbácea com 24,31%, Vegetação florestal com 8,68%, Massas de água com 0,88 e Horticultura com 0,18% da área da BH. A vegetação florestal está fragmentada ao longo dos córregos e altamente degradada com a presença da espécie exótica Leucenas. O fragmento mais representativo em área e em preservação é a RPPN inserida no campus da UFMS. A classe vegetação herbácea engloba regiões de vazios urbanos, canteiros e praças.

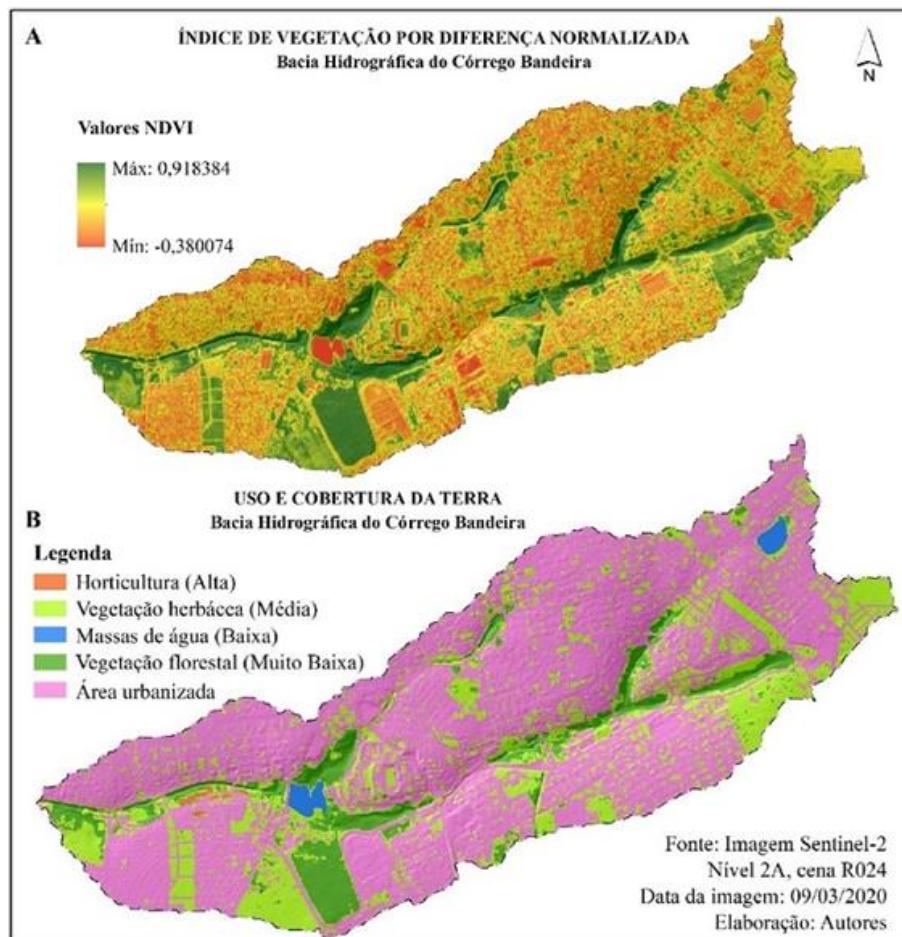


Figura 4
NDVI (A) e NDVI reclassificado (B) para a bacia hidrográfica do córrego Bandeira
Autores, 2021.

Susceptibilidade à erosão

A álgebra de mapas com os atributos topográficos D, ITCTS, ITU e ITPE derivados do MDE resultou em cinco classes de susceptibilidade à erosão: a classe Muito Baixa corresponde a 2,55% da área da bacia hidrográfica, a classe Baixa 45,87%, Média 34,55%, Alta 13,09 % e a classe Muito Alta 3,94%. Observando a Figura 5, os locais com maior susceptibilidade à erosão encontram-se ao longo dos canais de drenagem e malha viária, que concentram os fluxos superficiais durante eventos de chuva.

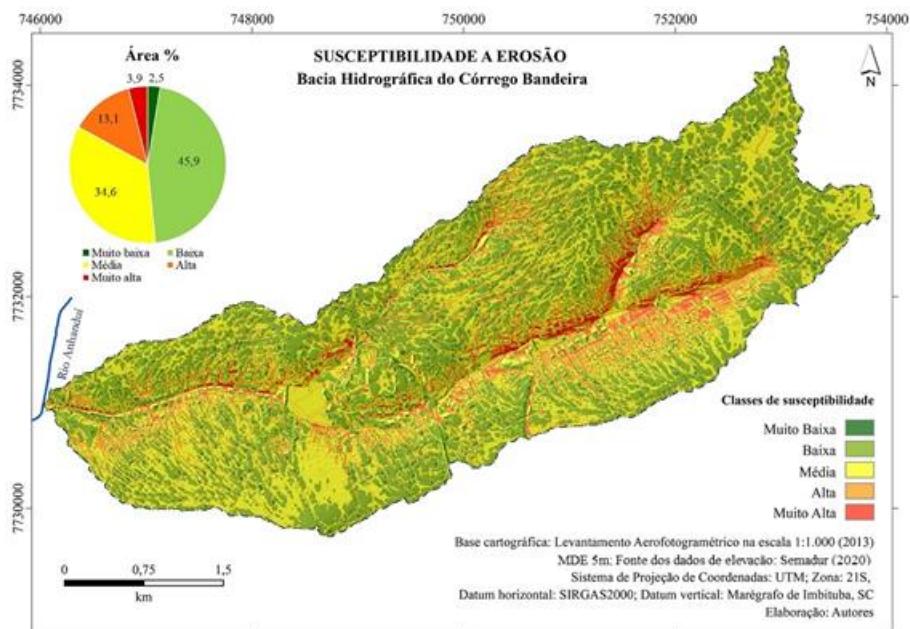


Figura 5
Susceptibilidade à erosão para a bacia hidrográfica do córrego Bandeira
Autores, 2021.

Para a integração das classes de uso e cobertura da terra (Figura 4B) ao produto da álgebra com atributos topográficos (Figura 5), a classe Vegetação florestal foi considerada de Muito Baixa susceptibilidade, devido à cobertura vegetal que intercepta às chuvas, aumentando à capacidade infiltração de água do solo e mantendo o solo no lugar (emaranhado de raízes). A classe Vegetação herbácea, que engloba lotes, canteiros e jardins foi considerada de susceptibilidade Média, pois essa cobertura fornece uma proteção intermediária do solo, em comparação com as áreas florestais e solo nu; a classe Massas de água foi considerada Baixa, pois os reservatórios funcionam como drenos de sedimentos e poluentes; a classe Horticultura foi considerada Alta, pois o sistema de manejo do solo é o convencional; a classe Área urbanizada, que engloba área construída, sistema viário pavimentado e não pavimentado, e lotes com solo exposto, embora afete significativamente os processos hidrológicos devido a impermeabilização que reduz a infiltração de água e aumenta o escoamento superficial potencializando a ocorrência de processos erosivos, como mencionado acima, não foi incluída, pois características de relevo que permitem identificar os locais que concentram os fluxos, como as ruas, e os locais com potencial de geração de escoamento, como as áreas úmidas, obtidas a partir dos atributos topográficos derivados do MDE, seriam perdidas.

Com a integração das classes de uso e cobertura da terra: vegetação florestal, vegetação herbácea, horticultura e massas de água (Figura 4B) ao produto da álgebra de mapas com os atributos topográficos (Figura 5), a classe Muito Baixa passou a corresponder a 10,63% da área da bacia hidrográfica, a classe Baixa 33,85%, Média 45,82%, Alta 8,03% e Muito Alta a 1,68% da área da bacia hidrográfica (Figura 6).

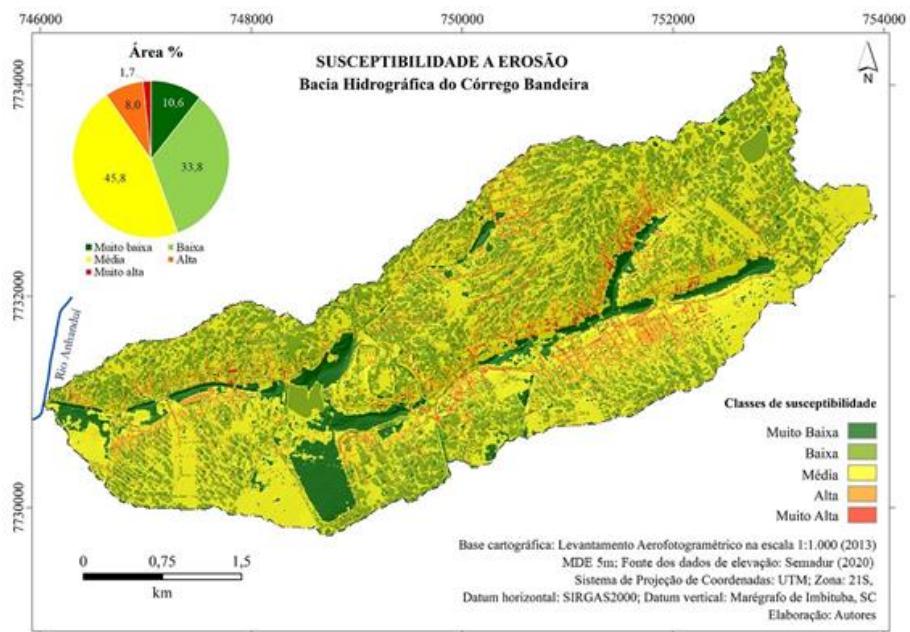


Figura 6
Suscetibilidade à erosão para a bacia hidrográfica do córrego Bandeira
Autores, 2021.

A presença de vegetação florestal nos fundos de vale possibilita um aumento da infiltração de água no solo, diminuindo a velocidade do escoamento superficial e interceptando os sedimentos e poluentes carreados das encostas. A cobertura vegetal e o emaranhado de raízes também ajudam na estabilização de margens. Contudo, em eventos de chuva, a impermeabilização dos solos urbanos e o sistema de drenagem pluvial faz com que as águas pluviais cheguem rapidamente aos rios diminuindo o tempo de concentração e aumentando significativamente a vazão, que, por sua vez, aumenta o poder de erosão das margens. As áreas que não possuem cobertura vegetal, florestal ou arbórea, e que concentram os fluxos superficiais, estão mais susceptíveis ao desenvolvimento de processos erosivos.

Discussões

Os sedimentos presentes em áreas urbanas resultam da combinação de fontes naturais e antropogênicas (TAYLOR, 2007), sendo as principais fontes antropogênicas já identificadas em diversas pesquisas, as obras de infraestrutura que expõem o solo, as vias de circulação sem pavimentação com sistema de drenagem pluvial inexistente, a limpeza de terrenos e, terraplanagens para novos loteamentos (TUCCI, 2003; POLETO; LAURENTIL, 2008; POLETO; CASTILHOS, 2008). A quantidade de sedimentos remobilizada varia sazonalmente e é maior na época chuvosa, sobretudo, durante eventos de elevada magnitude (CARVALHO, 2008). No canal, as partículas são transportadas dissolvidas, em suspensão ou então, no leito do canal, rolando, deslizando ou em saltos (CARVALHO, et al., 2000).

Na bacia hidrográfica do córrego Bandeira os processos erosivos ativos decorrem de um conjunto de elementos da dinâmica da sociedade, no qual se incluem a abertura de loteamentos em compartimentos geomorfológicos de topo, encostas e sopé; terraplanagens (Figura 7A,B); ruas não pavimentadas e com sistema de drenagem pluvial inexistente (Figura 7C,D) e; erosão nas margens. Grande parte dos sedimentos erodidos das vertentes são apenas remobilizados dentro da BH. Quando eles atingem os canais de drenagem, as partículas finas são transportadas (dissolvidas e em suspensão) a longas distâncias, as mais grosseiras são aprisionadas nos reservatórios.



Figura 7

Terraplanagem com formação de ravinas (A, B); sulcos e ravinas em vias não pavimentadas e com sistema de drenagem pluvial inexistente (C, D)

Givanildo Ferreira Baloque, data: 14/12/2020.

Embora o sistema de drenagem de água pluviais é um direito básico previsto na Lei Federal n. 11.445 (BRASIL, 2007) que “estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico”, em campo constatou-se que em muitas áreas a legislação não é cumprida. O manejo de resíduos sólidos e limpeza urbana, direito previsto nesta Lei, também não são cumpridos na integra pelo poder público. É comum a presença de resíduos sólidos da construção civil e domiciliares em vários pontos da bacia hidrográfica, como mostra a Figura 8, o que comprova o gerenciamento inadequado dos resíduos sólidos no município.

Em eventos de chuvas intensas, os resíduos dispostos em locais inadequados causam a obstrução das bocas de lobo, e intensificam os processos erosivos. Parte do material deposita nas áreas mais baixas do terreno sendo apenas remobilizado dentro da BH, parte é retido pela vegetação nos fundos de vale, e parte atinge os rios, causando assoreamento. Também é comum visualizar plástico preso às raízes nas margens, após eventos de precipitação (Figura 9).



Figura 8

Descarte de resíduos domiciliares (A, B); e da construção civil (C, D) às margens de vias
Givanildo Ferreira Baloque. A e B em 20/09/2020, C e D em 14/12/2020.

A rede de drenagem, mapeada a partir das curvas de nível do aerolevantamento na escala 1:1.000 do ano de 2013 (SEMADUR, 2020) e, tendo como plano de fundo as imagens de alta resolução espacial do World Imagery, também evidencia o impacto da urbanização. Vários trechos dos canais de drenagem estão canalizados e retificados, as margens e o leito estão concretados (Figura 9) e, barragens foram construídas no canal principal (Figuras 10 e 11). As nascentes encontram-se completamente descaracterizadas, tendo sido a maioria delas drenadas e incorporadas ao ambiente urbano. A nascente do córrego Portinho Pache (Figura 12) foi transformada em um lago artificial (Lagoa Itatiaia).



Figura 9

Impactos da urbanização na rede de drenagem

Givanildo Ferreira Baloque, data 14/12/2020; Fonte das imagens de satélite: Google Earth.

Os reservatórios Rádio Clube e Lago do Amor, cujas barragens foram construídas no canal de drenagem, funcionam como drenos de sedimentos. Como pode ser visualizado na Figura 10, o reservatório Rádio Clube encontra-se completamente assoreado. De acordo com o Plano de Ação de Drenagem de Águas Pluviais de Campo Grande/MS (CAMPO GRANDE, 2019), estavam previstas obras de desassoreamento deste reservatório para os anos de 2019 e 2020. Porém, em campo foi constatado que não existem obras em execução no local.



Figura 10

Reservatório Rádio clube em 2002 (A); e em 2020 (B)

Fonte das imagens de satélite: Google Earth.

O reservatório Lago do Amor (Figura 11), inicialmente chamado de Lago das Tulipas, formado a partir da construção de uma barragem na confluência dos córregos Cabaça e Bandeira no ano de 1968 (SOBRINHO, 2017), passou a ser o principal dreno de sedimentos da BH com o assoreamento do reservatório Rádio Clube, a montante. A construção dessa barragem e formação do reservatório tinha como objetivo promover o embelezamento do campus da UFMS, servir

de referência para pesquisas ambientais e, amenizar o clima seco (OLIVEIRA, 2018). Contudo, assim como o reservatório Rádio Clube, o Lago do Amor é exemplo do planejamento e gestão inadequados dos recursos hídricos.

O Grupo de Pesquisa Heros/UFMS monitora a evolução do assoreamento do Lago do Amor desde 2002, e em levantamento batimétrico realizado no ano de 2008 a profundidade máxima encontrada foi de 4,89 m e a profundidade média de 2,15 m (SOBRINHO, 2017). Entre 2002 e 2011 a profundidade média do reservatório havia reduzido 13 cm (ANACHE, et al., 2012). Em levantamento batimétrico de 2018, a profundidade máxima encontrada no reservatório foi de 4,32 m e a média de 1,87 m (FERREIRA, et al., 2019), o que representa uma perda de cerca de 37% de volume em comparação a 2008. A partir da taxa de variação de volume, Ferreira et al. (2019) estimaram o tempo de vida útil do reservatório, caso não ocorram intervenções na bacia hidrográfica a fim de controlar os sedimentos na fonte e no reservatório (dragagem), para o ano de 2036.



Figura 11

Reservatório Lago do Amor em 2002 (A); e em processo de assoreamento em 2020 (B)

Fonte das imagens de satélite: Google Earth.

A Lagoa Itatiaia (Figura 12), antiga área úmida na cabeceira de drenagem do córrego Portinho Pache, foi declarada como Área Especial de Interesse Ambiental, quando da instituição do Plano Diretor de Campo Grande (CAMPO GRANDE, 1995). Em 2018, a Câmara Municipal aprovou a Lei n. 6.085 (CAMPO GRANDE, 2018) que institui o “Programa Lagoa Itatiaia Viva” com objetivos de: “I - promover a conservação das características naturais do ambiente; II - contribuir para a proteção da diversidade biológica; III - proporcionar meios e incentivos para atividades de pesquisa científica, estudos e monitoramento ambiental”.

Em estudos realizados pelo Instituto Municipal de Planejamento Urbano e de Meio Ambiente, no projeto Reviva a Lagoa Itatiaia, foi constatado que a lagoa possuía uma área total de 9 ha de espelho d’água e profundidade média de 1 m (CAMILLO, et al., 2007). Em batimetria realizada em novembro de 2018, o volume do lago correspondia a 26.378 m³, espelho d’água de 6,02 ha, e a profundidade do lago variou entre 0 e 1,67 m (SOBRINHO, 2018). De acordo com esses dados, em 15 anos

a lagoa perdeu três ha de espelho d’água, reforçando a importância de ações que possam minimizar a degradação das margens e o assoreamento, como a pavimentação das vias que concentram e direcionam os fluxos superficiais para a lagoa e a restauração florestal das margens.



Figura 12:
Lagoa Itatiaia, cabeceira de drenagem do córrego Portinho Pache
Fonte das imagens de satélite: Google Earth.

O presente trabalho mostrou que a dinâmica sociedade e natureza na produção do espaço urbano tem degradado os ecossistemas terrestres e aquáticos. Além da interferência na dinâmica hídrica, foi possível visualizar a construção de relevos tecnogênicos, em que as vertentes passam a ser esculturadas de forma acelerada por meio das escavações, instalação de loteamentos, nivelamento de taludes, abertura de vias, limpeza de lotes, etc., que expõe o solo e acelera a esculturação do relevo. Uma vez destacados, os sedimentos podem ser redistribuídos na bacia hidrográfica (efeitos no local), e quando atingem os cursos d’água, sair da BH (efeitos fora do local).

Os sedimentos que chegam aos canais de drenagem causam degradação de ordem física (assoreamento) e química (degradação da qualidade da água). Os sedimentos finos (argilosos) e a matéria orgânica, que são os mais reativos, são os principais adsorventes/complexantes de poluentes que impactam a qualidade da água. Segundo Polo e Laurenti (2008), na calha fluvial, em razão dos fenômenos de deposição-ressuspensão-deposição, o movimento dessas partículas agregadas aos sedimentos, é retardado em relação ao movimento da água, favorecendo um maior tempo de retenção dessas substâncias no sedimento, o que eleva seu potencial de contaminação desses ambientes. Os poluentes adsorvidos às partículas de sedimento ou complexados na matéria orgânica, podem ser posteriormente liberados, por ocasião de modificações das características do ambiente, por exemplo: teores de oxigênio dissolvido, pH e temperatura da água.

Os esforços feitos no sentido de preservação ambiental pela gestão municipal, como a criação de parques lineares (que resultou no aumento de áreas verdes no perímetro urbano de Campo Grande com Leucena), e construção de barragens para amortecimento de cheias (que se tornaram drenos de sedimentos e encontram-se completamente assoreadas, caso do reservatório Rádio clube e em processo de assoreamento, como o Lago do Amor e Lagoa Itatiaia), são práticas que, conforme Furlan e Froés

(2020), estão embasadas principalmente na ideia de que a ordenação territorial promovida e/ou autorizada pelo Estado é a que garante a preservação ambiental ou a ausência de risco (que apresentam categorias genéricas), muitas delas positivadas e sem uma definição clara que possa colaborar com uma efetiva transformação social e garantir um meio urbano ecologicamente equilibrado e socialmente justo.

A construção de barragens e bacias de contenção não irão resolver os problemas recorrentes de inundações e o assoreamento de reservatórios (Rádio Clube, Lago do Amor, Lagoa Itatiaia, Lago do Parque das Nações Indígenas) na área urbana de Campo Grande. Por que a água chega rapidamente aos rios? Quais são as estratégias para aumentar o tempo de concentração da água na bacia hidrográfica? Quais são as principais fontes de sedimentos em áreas urbanas? As taxas de erosão são uniformes ao longo do ano? Quais são os períodos críticos? Quais são as estratégias disponíveis para combater a sedimentação de reservatórios? As respostas a estes questionamentos estão disponíveis há décadas, falta somente colocá-las em prática.

Considerações finais

A álgebra de mapas com atributos topográficos derivados de um modelo digital de elevação de alta resolução espacial integrado ao uso e cobertura da terra permitiu a identificação dos locais mais suscetíveis ao desenvolvimento de processos erosivos na bacia hidrográfica do córrego Bandeira. A classe de susceptibilidade Muito Baixa corresponde a 10,63%, a classe Baixa 33,85%, Média 45,82%, Alta 8,03% e Muito Alta a 1,68% da área da bacia hidrográfica. As principais fontes de sedimentos identificadas e classificadas como de susceptibilidade Alta e Muito Alta são as vias sem pavimentação e com sistema de drenagem de águas pluviais inexistente, que concentram os fluxos superficiais na forma de enxurrada; a classe Média, que engloba áreas com vazios urbanos e cuja limpeza de lotes expõe aos processos erosivos; terraplanagens para novas construções; e erosão das margens em função do rápido aumento da vazão em eventos de chuva como consequência da impermeabilização dos solos urbanos. Os principais drenos de sedimentos são os reservatórios.

Os resultados obtidos no presente trabalho podem servir de subsídio para o planejamento e gestão ambiental e subsidiar outros estudos na bacia hidrográfica. O método utilizado neste trabalho pode ser aplicado às demais bacias hidrográficas urbanas de Campo Grande.

Referências

- ANACHE, J. A. A. et al. Avaliação do assoreamento de reservatório artificial através da análise multitemporal de dados batimétricos. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE SEDIMENTOS, 10, 2012, Foz do Iguaçu. *Anais ...* Porto Alegre: ABRH, 2012. p. 1-12.
- ARABAMERI, A. K. et al. GIS based gully erosion susceptibility mapping: A comparison among three data driven models and AHP knowledge-based

- technique. **Environmental Earth Sciences**, [S./l.], v. 77, n. 17, p. 628, 2018.
- BEVEN, K. J.; KIRKBY, M. J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. **Hydrological Sciences Bulletin**, [S./l.], v. 24, n. 1, p. 43-69, 1979.
- BEVEN, K. J. et al. Testing a physically-based flood forecasting model (Topmodel) for three U.K. catchments. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 69, p. 119-143, 1984.
- BEVEN, K. J.; WOOD, E. F.; SIVAPALAN, M. On hydrological heterogeneity – catchment morphology and catchment response. **Journal of Hydrology**, [S./l.], v. 100, p. 353-375, 1988.
- BRASIL. Lei n.11.445, de 5 de janeiro de 2007. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 08 jan. 2007.
- BRASIL. **Portaria n. PR-254**, de 25 de agosto de 2020. Disponível em: Diário Oficial da União. <https://www.in.gov.br/web/dou/-/portaria-n-pr-254-d-e-25-de-agosto-de-2020-274382852>. Acesso em: 27 set 2020.
- BURROUGH, P. A. **Principles of geographical information systems for land resources assessment**. Oxford: Clarendon Press, 1986.
- CÂMARA, G. Representação computacional de dados geográficos. In: CASANOVA, M. et al. (Org.). **Banco de Dados Geográficos**. Curitiba: MundoGEO, 2005. pp. 1-44.
- CAMILLO, C. S. et al. Impactos físicos e biológicos provenientes do projeto urbanístico “Reviva Lagoa Itatiaia” Campo Grande, MS e suas consequências. **Multitemas**, Campo Grande, v. 35, p. 7-42, dez. 2007.
- CAMPO GRANDE. Decreto n. 12.680, de 9 de julho de 2015. Aprova o Plano Diretor de Drenagem Urbana do Município De Campo Grande - MS.
- DIOGRANDE. Campo Grande. ano 18, n. 4.313, jul. 2015.
- CAMPO GRANDE. Lei n. 6.085, de 04 de setembro de 2018. Institui o “Programa Lagoa Itatiaia Viva” no âmbito do município de Campo Grande-MS e dá outras providências. **DIOGRANDE**. Campo Grande. ano 21, n. 5.342, set. 2015. Disponível em: <http://www.primeiranoticia.ufms.br/upload/ckeditor/files/20180904191425.pdf>. Acesso em: 05 dez. 2020.
- CAMPO GRANDE. Extrato do contrato n. 20, celebrado em 7 de março de 2013. **DIOGRANDE**. Campo Grande. ano 16, n. 3.735, abr. 2013. Disponível: <http://www.campogrande.ms.gov.br/seges/wp-content/uploads/sites/37/2017/01/20130401154027.pdf>. Acesso em: 23 jan. 2020.
- CAMPO GRANDE. **Lei Complementar n. 05**, de 22 de novembro de 1995. Disponível em: <https://cm-campo-grande.jusbrasil.com.br/legislacao/257187/lei-complementar-5-95>. Acesso em: 27 set. 2020.
- CAMPO GRANDE. **Lei n. 1.866**, de 26 de dezembro de 1979 – Código de Obras. Disponível em: <http://www.campogrande.ms.gov.br/semadur/downloads/lei-1866-261279-codigo-de-obras/>. Acesso em: 27 set. 2020.
- CAMPO GRANDE. **Plano de ação de drenagem de águas pluviais de Campo Grande/MS**. Disponível em: <http://campogrande.ms.gov.br/sisep/wp-content/uploads/sites/22/2019/05/Plano-de-Drenagem.pdf>. Acesso em: 05 dez. 2020.

- CAPOANE, V. et al. Uso de atributos topográficos para predição de áreas propensas a perda e a deposição de sedimento em uma bacia hidrográfica do planalto do Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 16, p. 469-483, 2015.
- CAPOANE, V.; SANTOS, D. R. dos.; KUPLICH, T. M. Efeito do uso da terra e relevo na distribuição espacial e vertical de carbono do solo em uma bacia hidrográfica agrícola. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 9, n. 6, p. 1629-1643, 2016.
- CARVALHO, N. de O. *Hidrossedimentologia prática*. 2. Ed. Rio de Janeiro: Interciênciac, 2008.
- CHEN, W. et al. A comparative study of logistic model tree, random forest, and classification and regression tree models for spatial prediction of landslide susceptibility. *Catena*, [S./l.], v. 151, p. 147-160, 2017.
- CHEN, C.Y.; YU, F. C. Morphometric analysis of debris flows and their source areas using GIS. *Geomorphology*, [S./l.], v. 129, n. 3-4, p. 387-397, 2011.
- COMERLATO, T.; LAMOUR, M. R.; SILVEIRA, C. T. Mapeamento digital de formas de relevo no ambiente costeiro do Paraná. *Caminhos de Geografia*, Uberlândia, v. 21, n. 73, p. 477-491, mar. 2020.
- CONRAD, O. et al. System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4. **Geoscientific Model Development**, [S./l.], v. 8, 1991-2007-2015.
- DI BALDASSARRE, G. et al., Towards understanding the dynamic behaviour of floodplains as human-water systems. *Hydrology and Earth System Sciences*, [S./l.], v. 17, p. 3235-3244, 2013.
- DI BALDASSARRE, G. et al. Flood fatalities in Africa: from diagnosis to mitigation. *Geophysical Research Letters*, [S./l.], v. 37, L22402, 2010.
- ECHIVERRI, L.; MACDONALD, E. Utilizing a topographic moisture index to characterize understory vegetation patterns in the boreal forest. *Forest Ecology and Management*, [S./l.], v. 447, n. 1, p. 35-52, set. 2019.
- ESA. European Spatial Agency. *Sentinel Application Platform – SNAP Desktop implementation version 7.0.4*. Disponível em: <http://step.esa.int/main/download/snap-download/>. Acesso em: 11 maio 2020.
- ESRI. *ArcGIS® Desktop 10.8.1*. ESRI, 2020.
- FERREIRA, M. E. A. et al. Assoreamento de reservatório urbano: estudo de caso do Lago do Amor. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 23, 2019, Foz do Iguaçu. *Anais ... Foz do Iguaçu: ABRHidro*, 2019. p. 1-7.
- FURLAN, D. L. S.; FRÓES, A. C. S. Ocupações de áreas ambientalmente frágeis em Almirante Tamandaré/PR: o direito à moradia em face da preservação do meio ambiente. *Cadernos Metrópole*, São Paulo, v. 22, n. 48, pp. 579-600, maio/ago 2020.
- GODOY, P. R. T; BRAY, S. C. Considerações sobre o espaço urbano no Brasil. In: GERARDI, L. H. de O. (Org.). *Ambientes: estudos da geografia*. Rio Claro: UNESP, 2003. p. 185-200.
- HACK, J. T. Interpretation of erosional topography in humid temperate regions. *American Journal of Science*, Bradley, v. 258, p. 80-97, 1960.
- HORTON, R. E. Drainage basin characteristics. *Transactions of the American Geophysical Union*, [S./l.], v. 13, p. 350-360, 1932.

- HUTCHINSON, M. F. A new procedure for gridding elevation and streamlines data with automatic removal of spurious pits. *Journal of Hydrology*, v. 106, p. 211-232, 1989.
- HUTCHINSON, M. F.; XU, T.; STEIN, J. A. Recent progress in the ANUDEM elevation gridding procedure. *Geomorphometry*, [S./l.], p. 19-22, 2011.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Mapeamento de recurso naturais do Brasil escala 1:250.000**. Rio de Janeiro, 2019.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Malha Municipal 2018**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/15774-malhas.html?edicao=24048&t=downloads>. Acesso em: 10 jun. 2020.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Demográfico 1872, 1890, 1900, 1920, 1940, 1950, 1960, 1970, 1980, 1991, 2000, 2010**. Disponível em: <https://censo2010.ibge.gov.br/sinopse/index.php?dados=4&uf=00>. Acesso em: 10 nov. 2020.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual técnico de geomorfologia**. 2. Ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2009.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **População nos Censos Demográficos, segundo as Grandes Regiões, as Unidades da Federação e a situação do domicílio - 1960/2010**. Disponível em: <https://censo2010.ibge.gov.br/sinopse/index.php?dados=8>. Acesso em: 10 nov. 2020.
- IMASUL. Instituto de Meio Ambiente de Mato Grosso do Sul. **Deliberação CECA n. 002/2003**. Disponível em: https://www.imasul.ms.gov.br/wp-content/uploads/2019/08/Planilha-CNUC_para-o-site_atualiz.-Dez_-2018.pdf. Acesso em: 10 jun. 2020.
- IRVIN, B. J.; VENTURA, S. J.; SLATER, B. K. Fuzzy and isodata classification of landform elements from digital terrain data in Pleasant Valley, Wisconsin. *Geoderma*, [S./l.], v. 77, n. 2-4, p. 137p154, 1997.
- LEPSCH, I. F. et al. **Manual para levantamento utilitário do meio físico e classificação de terras no sistema de capacidade de uso**. Viçosa: SBCC, 2015.
- LINDSAY, J. B.; CREED, I. F. Removal of artifact depressions from digital elevation models: towards a minimum impact approach. *Hydrological Processes*, [S./l.], v. 19, p. 3113-3126, 2005.
- MILLER, V. C. **A quantitative geomorphic study of drainage basin characteristic in the clinch, Mountain area, Verdinia and Tennessee**. Project NR 389-042, Tech. Rept.3. Columbia University, Department of Geology, ONR, Geography Branch, New York: Patton, 1953.
- MINELLA, J. P. G.; MERTEN, G. H.; RUHOFF, A. L. Utilização de métodos de representação espacial para cálculo do fator topográfico na equação universal de perda de solo revisada em bacias hidrográficas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, [S./l.], v. 34, p. 1455-1462, 2010.
- MOORE, D. et al. Soil attribute prediction using terrain analysis. *Soil Science Society of America Journal*, [S./l.], v. 57, p. 443-452, 1993.
- MOORE, I. D.; GRAYSON, R. B.; LADSON, A. R. Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications. *Hydrological Processes*, [S./l.], v. 5, n.1, p. 1-30, 1991.

- MOORE, I. D.; BURCH, G. J. Physical basis of the length slope factor in the universal soil loss equation. *Soil Science Society of America Journal*, [S./l.], v. 50, n. 5, p. 1294-1298, 1986a.
- MOORE, I. D.; BURCH, G. J. Modeling erosion and deposition. Topographic effects. *Transactions of the ASAE*, v. 29, n. 6, p. 1624-1630, 1986b.
- MOTTA, P. E. F. da et al. *Levantamento de reconhecimento de baixa intensidade dos solos do Município de Campo Grande, MS*. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2013.
- OLIVEIRA, C. V. C. de. *Impactos ambientais por urbanização acelerada no Lago do Amor em Campo Grande/MS*. 2018. 82 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais), Universidade Brasil, São Paulo, 2018.
- OLIVEIRA, F. O Estado e o urbano no Brasil. *Espaço & Debates*, São Paulo, n. 6, p. 27-41, 1982.
- PEI, T. et al. Mapping soil organic matter using the topographic wetness index: A comparative study based on different flow-direction algorithms and kriging methods. *Ecological Indicators*, v. 10, n. 3, p. 610-619, 2010.
- POLETO, C.; CASTILHOS, Z. C. Impacto por poluição difusa de sedimentos em bacias urbanas. In: POLETO, C. (Org.). *Ambiente e Sedimentos*, Porto Alegre: ABRH, 2008. p. 194-290.
- POLETO, C.; LAURENTI, A. Sedimentos urbanos e corpos d'água. In: POLETO, C. (Org.). *Ambiente e Sedimentos*. Porto Alegre: ABRH, 2008. p. 110-48.
- POURALI, S. H. et al. Topography wetness index application in flood-risk-based land use Planning. *Applied Spatial Analysis and Policy*, [S./l.], v. 9, p. 39-54, 2016.
- POURGHASEMI, H., B. et al. A comparative assessment of prediction capabilities of Dempster-Shafer and weights-of-evidence models in landslide susceptibility mapping using GIS. *Geomatics Natural Hazards and Risk*, [S./l.], v. 4, n. 2. p. 93-118, 2013.
- RADUŁA, M. W.; SZYMURA, T. H.; SZYMURA, M. Topographic wetness index explains soil moisture better than bioindication with Ellenberg's indicator values. *Ecological Indicators*, [S./l.], v. 85, p. 172-179, fev. 2018.
- REUTER, H.; NELSON, A.; JARVIS, A. An evaluation of void filling interpolation methods for SRTM data. *International Journal of Geographical Information Science*, [S./l.], v. 21, n. 9, p. 983-1008, 2007.
- RITCHIE, H.; ROSEN, M. *Urbanization*. 2019. Disponível em: <https://ourworldindata.org/urbanization>. Acesso em: 17 nov. 2020.
- RODRÍGUEZ-MORENO, V. M.; BULLOCK, S. H. Vegetation response to hydrologic and geomorphic factors in an arid region of the Baja California Peninsula. *Environmental Monitoring and Assessment*, [S./l.], v. 186, n. 2, p. 1009-1021, set. 2014.
- ROSS, J. L. S. et al. Macroformas do relevo da América do Sul. *Revista do Departamento de Geografia*, [S./l.], v. 38, p. 58-69, 2019.
- ROUSE, J. W. et al. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: EARTH RESOURCES TECHNOLOGY SATELLITE - 1 SYMPOSIUM, 3, 1973, Washington. *Proceedings ... Whashington: NASA*, 1973. p. 309-317.
- SANTOS, M. A. *Urbanização brasileira*. São Paulo: Hucitec, 1993.

- SCHUMM, S. A. Evolution of drainage system and slope in badlands of Perth Amboy, New Jersey. *Bulletin of the Geological Society of America*, [S./l.], v. 67, n. 5, p. 597–646, 1956.
- SEMADUR. Secretaria Municipal de Meio Ambiente e Gestão Urbana. *Arquivos vetoriais de Campo Grande - MS*. 2020. Disponível em: <http://www.campogrande.ms.gov.br/semadur/arquivos-vetoriais-de-campo-grande/>. Acesso em: 20 abr. 2020.
- SEPLAN. Secretaria Municipal do Planejamento e PLANURB Unidade de Planejamento Urbano. *Carta Geotécnica de Campo Grande*. Campo Grande, 1991.
- SHANA, B.; YANG, X.; ZHU, Q. Effects of DEM resolutions on LS and hillslope erosion estimation in a burnt landscape. *Soil Research*, [S./l.], v. 57, n. 7, p. 797-804, jul. 2019.
- SILVEIRA, C. T. et al. Pedometria apoiada em atributos topográficos com operações de tabulação cruzada por álgebra de mapas. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, [S./l.], v. 13, n. 2, p. 125-137, abr./jun. 2012.
- SILVEIRA, C. T. Análise digital do relevo na predição de unidades preliminares de mapeamento de solos: Integração de atributos topográficos em Sistemas de Informações Geográficas e redes neurais artificiais. 2010. 153 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.
- SIVAPALAN, M.; WOOD, E. F.; BEVEN, K. J. On hydrologic similarity. 3. A dimensionless flood frequency model using a generalized geomorphologic unit hydrograph and partial area runoff generation. *Water Resources Research*, [S./l.], v. 26, p. 43-58, 1990.
- SOBRINHO, T. A. O Lago do Amor em questão. Grupo HEoS: hidrologia erosão e sedimento/UFMS. 2017. Disponível em: <http://heros.sites.ufms.br/files/2016/08/LAGO-DO-AMOR-em-QUESTOES.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2020.
- SOBRINHO, T. Relatório de batimetria lagoa Itatiaia. 2018. Disponível em: <http://heros.sites.ufms.br/files/2019/06/Relatorio-batimetria-lagoa-Itatiaia-2018.pdf>. Acesso em: 27 set. 2020.
- STRAHLER, A. N. Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks. In: CHOW, V. (Ed.). *Handbook of applied hydrology*. New York: McGraw-Hill Book Co, 1964.
- TAYLOR, K. Urban environments. In: PERRY, C.; TAYLOR, K. (Org.). *Environmental sedimentology*. Blackwell Publishing: 2007. p. 190-222.
- TENCATEN, A. et al. Mapeamento digital de classes de solos: características da abordagem brasileira. *Ciência Rural*, Santa Maria, v. 42, n. 11, nov. 2012.
- TOMLIN, C. D. Map algebra: one perspective. *Landscape and Urban Planning*, v. 30, p. 3-12, 1994.
- TUCCI, C. E. M. Inundações e Drenagem Urbana. In: TUCCI, C. E. M.; BERTONI, J. C. (Org.). *Inundações Urbanas na América do Sul*. Porto Alegre: ABRH, 2003. p. 45-141.
- UN. United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. *World Urbanization Prospects 2018: Highlights*, 2019. Disponível em: <https://population.un.org/wup/Publications/Files/WUP2018-Highlights.pdf>. Acesso em: 12 nov. 2020.

- VAN NIEL, K. P.; LAFFAN, S. W. LEES, B. G. Effect of error in the DEM on environmental variables for predictive vegetation modeling. *Journal of Vegetation Science*, [S./l.], v. 5, n. 6, p. 747-756, 2004.
- VIJITH, H.; DODGE-WAN, D. Spatio-temporal changes in rate of soil loss and erosion vulnerability of selected region in the tropical forests of Borneo during last three decades. *Earth Science Informatics*, [S./l.], v. 11, n. 2, p. 171-181, 2018.
- WEINGARTNER, G. Qualidade ambiental e gestão do espaço público: a política administrativa e o papel do sistema de espaços livres públicos no território urbano de Campo Grande-MS. *Ensaios e Ciência: Ciências Biológicas, Agrárias e da Saúde*, Campo Grande, v. 5, n. 3, p. 133-159, dez. 2001.
- WELSCH, D. L. et al. Topographic controls on the chemistry of subsurface stormflow. *Hydrological Processes*, [S./l.], v. 15, n. 10, 1925-1938, 2001.
- WHITE, J. D.; RUNNING, S. W. Testing scale-dependent assumptions in regional ecosystem simulations. *Journal of Vegetation Science*, [S./l.], v. 5, p. 687-702, 1994.
- WILSON, J. P.; GALLANT, J. C. Digital terrain analysis. In: WILSON, J. P.; GALLANT, J. C. (Eds.). *Terrain analysis: principles and applications*. New York: John Wiley and Sons, Inc., 2000, p. 1-27.
- WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. *Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning*. Washington: US Department of Agriculture, 1978.
- YESILNACAR, E.; TOPAL, T. Landslide susceptibility mapping: a comparison of logistic regression and neural networks methods in a medium scale study, Hendek Region (Turkey). *Engineering Geology*, [S./l.], v. 79, p. 251-266, 2005.
- ZHANG, W.; MONTGOMERY, D. R. Digital elevation model grid size, landscape representation, and hydrologic simulations. *Water Resources Research*, [S./l.], v. 30, n. 4, p. 1019-1028, abr. 1994.

Notas

AutoresGivanildo Ferreira Baloque – É Graduado em Geografia Bacharelado pela Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul (UEMS).

Endereço: Avenida Dom Antônio Barbosa, 4155 - Vila Santo Amaro, Campo Grande - MS, 79115-898.

Viviane Capoane – É Graduada em Geografia pela Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Mestre em Ciência do Solo pela UFSM e Doutora em Geografia pela Universidade Federal do Paraná (UFPR). Atualmente é Professora do Curso de Geografia na Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul (UEMS), Unidade Universitária de Campo Grande.

Endereço: Avenida Dom Antônio Barbosa, 4155 - Vila Santo Amaro, Campo Grande - MS, 79115-898.