



Mercator - Revista de Geografia da UFC
ISSN:
ISSN: 1984-2201
edantas@ufc.br
Universidade Federal do Ceará
Brasil

VARIABILIDADE ESPACIAL DAS ESTIMATIVAS DE GERAÇÃO E CONECTIVIDADE DE SEDIMENTOS EM MICROBACIAS HIDROGRÁFICAS DE CONTRIBUIÇÃO UHE

Dias Nunes, Elizon

VARIABILIDADE ESPACIAL DAS ESTIMATIVAS DE GERAÇÃO E CONECTIVIDADE DE
SEDIMENTOS EM MICROBACIAS HIDROGRÁFICAS DE CONTRIBUIÇÃO UHE

Mercator - Revista de Geografia da UFC, vol. 21, núm. 1, 2022

Universidade Federal do Ceará

Disponível em: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=273674020027>

VARIABILIDADE ESPACIAL DAS ESTIMATIVAS DE GERAÇÃO E CONECTIVIDADE DE SEDIMENTOS EM MICROBACIAS HIDROGRÁFICAS DE CONTRIBUIÇÃO UHE

Elizon Dias Nunes

Pela Geographer Universidade Federal de Goiás (UFG),

Goiânia (GO), Brasil, Brasil

elizonnunes@ufg.br



Acceso abierto diamante

Abstract

O conhecimento da variabilidade espacial da geração e transporte de sedimentos permite identificar com considerável precisão áreas críticas quanto à geração e escoamento de materiais detritais em bacias hidrográficas. Este trabalho tem como objetivo relacionar a variabilidade espacial da perda de solo e conectividade de sedimentos em uma bacia de contribuição do reservatório da Usina Hidrelétrica Batalha, no município de Cristalina (GO). A metodologia compreendeu a correlação espacial bivariada entre as estimativas de produção (MUSLE) e o Índice de Conectividade (IC) aplicado em escala de inclinação na área de contribuição da bacia. Os resultados indicam a configuração de quatro padrões espaciais: baixa produção e baixo índice de conectividade na maior parte da área, compreendendo as porções mais altas e planas; baixa produção e alto índice de conectividade no entorno de nascentes e canais de drenagem; alta produção e baixo índice de conectividade nas porções mais altas, íngremes e distantes; e alta produção e alta conectividade, predominando nas porções mais íngremes e mais próximas dos canais ou mesmo naquelas porções mais distantes, mas conectadas ao canal, nesta última situação por meio de linhas de escoamento superficial mais intensas. Nesse sentido, destaca-se a importância dessa metodologia na identificação de áreas críticas, que são áreas prioritárias para a implementação de medidas mitigadoras dos impactos decorrentes de processos erosivos hídricos.

Keywords: Erosão hídrica, Contribuição de Sedimentos, Áreas Críticas, Reservatórios de Água.

Resumo

O conhecimento da variabilidade espacial da produção e transporte de sedimentos permite identificar, com considerável precisão (diferentes situações, quanto), áreas críticas, bem como a geração e fluxo de materiais detritais em bacias hidrográficas. O objetivo deste artigo é relacionar a variabilidade espacial da perda do solo e a conectividade de sedimentos em uma bacia de contribuição do reservatório da usina hidrelétrica Batalha, no município de Cristalina (GO). A metodologia compreende a correlação espacial bivariada entre as estimativas de produção (MUSLE) e o Índice de Conectividade (IC) aplicado na escala de derramamento na área de contribuição para a bacia. Os resultados indicam a configuração de quatro padrões espaciais: baixa produção e baixo índice de conectividade na maior parte da área, compreendendo as porções mais elevadas e planas; Baixa produção e elevado índice de conectividade nas imediações das nascentes e dos canais de drenagem; alta produção e baixo índice de conectividade nos portos mais elevados, íngremes e distantes; Alta produção e alta conectividade, predominando nos dois canais mais íngremes e próximos ou no mesmo distante e conectado ao canal, nesta última situação através de linhas de fluxo de maior pontuação superficial. Nesse sentido, destaca-se a importância dessa metodologia na identificação de áreas críticas e, portanto, prioritárias para a implementação de medidas mitigadoras contra os impactos decorativos dos processos erosivos da água.

Palavras-chave: Erosão Hídrica, Entrada de Sedimentos, Áreas Críticas, Reservatórios.

Resumen

Notas de autor

elizonnunes@ufg.br

O conhecimento da variabilidade espacial da produção e transporte de sedimentos permite identificar com alto grau de precisão diferentes situações de geração e escoamento de materiais detritais em bacias hidrográficas. Este trabalho tem como objetivo relacionar a variabilidade espacial da perda de solo e conectividade de sedimentos em uma bacia hidrográfica do reservatório da usina hidrelétrica Batalha, no município de Cristalina, Goiás, Brasil. A metodologia consistiu na correlação espacial bivariada entre as estimativas de produção (MUSLE) e o Índice de Conectividade (IC), aplicado na escala de inclinação na área de contribuição da bacia. Os resultados indicam a configuração de quatro padrões espaciais: baixa produção e baixo índice de conectividade na maior parte da área, compreendendo as porções mais altas e planas; baixa produção e alta conectividade no entorno de nascentes e canais de drenagem; alta produção e baixo índice de conectividade nas porções mais altas, íngremes e distantes; e alta produção e alta conectividade prevalecendo nas porções mais íngremes e mais próximas dos canais ou mesmo naquelas mais distantes e conectadas ao canal, nesta última situação através de linhas de escoamento superficial mais intensas. Nesse sentido, destaca-se a importância dessa metodologia na identificação de áreas críticas e, portanto, prioritárias para a implementação de medidas mitigadoras dos impactos decorrentes de processos erosivos da água.

Palabras clave: Erosão hídrica, Contribuição de Sedimentos, Áreas Críticas, Reservatórios.

INTRODUÇÃO

O conhecimento da variabilidade espaço-temporal dos táxons de degradação dos sedimentos isolados e da dinâmica dos sedimentos em bacias hidrográficas, principalmente aquelas com estruturas destinadas ao uso múltiplo da água, sempre foram de grande importância ao longo da história das civilizações (LIU et al., 2017). Isso porque essas grandes estruturas, além de regular o fluxo dos rios, atenuam os efeitos da sazonalidade climática e garantem água nos períodos de estiagem, passaram a adquirir, ao largo de sua existência, novos significados devido à sua importância como fonte de abastecimento e energia. geração, entre tantas outras atividades relacionadas ao dinamismo econômico na área de influência de suas instalações (PHUONG; SHRESTHA; CHUONG, 2017; MORRIS, 2020; THOMAS et al., 2020).

Os modelos espaço-temporais resultam da necessidade de preencher vazios espaciais e temporais decorrentes da impossibilidade (de levantar cada área diretamente) de trabalhar com levantamento direto de campo. Trata-se de uma alternativa baseada em evidências e estruturada por meio de diversos dados contínuos e considerados mais importantes, apoiada direta e indiretamente por dados de cauda, e complementada por diferentes modos de verificação em campo (COLMAN et al., 2018; CORRÊA; CRUZ, 2010; EZZAOUINI et al., 2020; HARMON et al., 2019; MITASOVA et al., 1996). Modelos empíricos estão disponíveis, com eventuais discrepâncias em relação à realidade que pode ser observada no campo, quando aplicados a grandes áreas tornam-se significativos porque a cobertura espacial e temporal implica ganhos de eficiência. Os processos erosivos que ocorrem na terra'

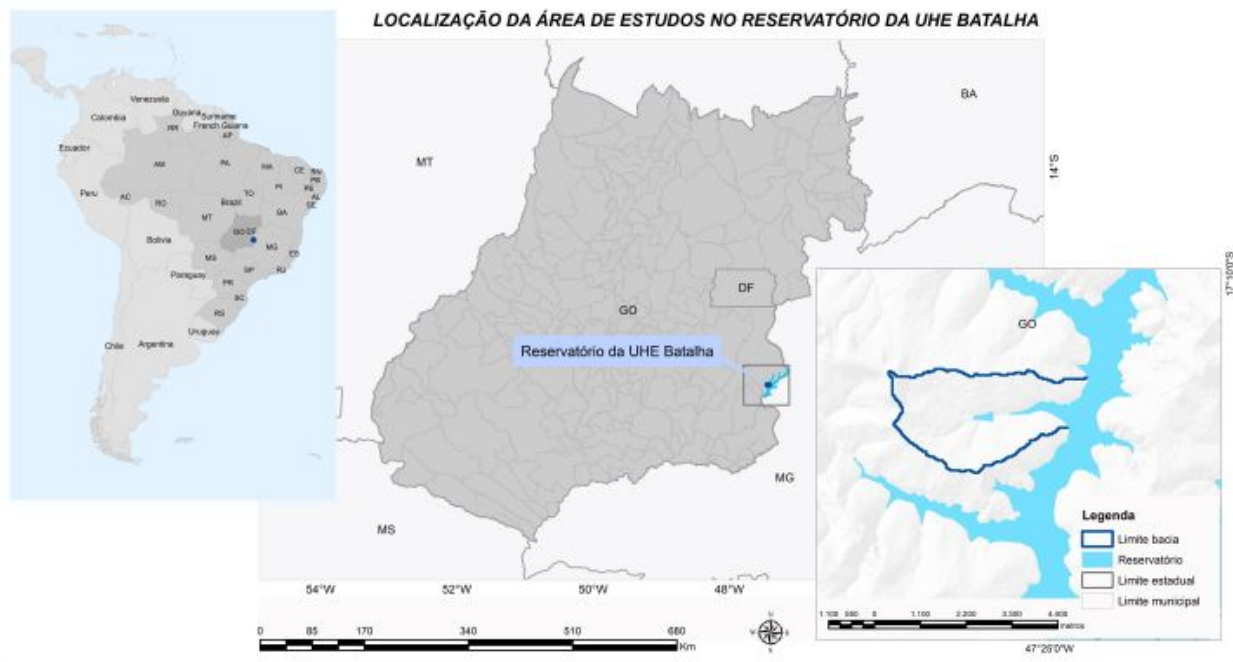
Dentre os modelos sedimentológicos mais utilizados na maioria dos países, destaca-se o Universal Modified Single Loss (MUSLE), que após diversas adaptações, apresenta ampla aplicação e desempenho satisfatório para as mais diversas condições ambientais (AREKHI; SHABANI; ROSTAMIZAD, 2011; BENAVIDEZ et al., 2018; SADEGHI et al., 2014). Este é um modelo projetado para estimar as perdas de solo por evento de chuva. Foi desenvolvido na década de 1960 pelo Serviço Único de Conservação do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (SCS - USDA) e desde então vem sendo modificado, conforme modificado para diversas condições geográficas (KITAHARA et al., 2002). Quando aplicada, essa equação permite a identificação de áreas potencialmente erodidas e, conseqüentemente, propensas ao manejo de sedimentos (SILVA, 2004).

Considerando o exposto, o presente trabalho tem como objetivo estimar e relacionar a variabilidade espacial da perda apenas do Índice de Conectividade (IC) de sedimentos na área de contribuição da bacia, bem como avaliar o resultado da interação das duas importantes variáveis na configuração de possíveis áreas críticas quanto à geração e transporte de sedimentos em uma hidrográfica tributária do córrego São Firmino no município de Cristalina - GO.

MATERIAIS E MÉTODOS

LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de pesquisa compreende uma bacia hidrográfica da margem direta do Rio São Firmino, afluente do Rio São Marcos, no município de Cristalina no Estado de Goiás - Brasil, conforme Figura 1. As partes superiores, em residuais e formas planas, são suportadas por Coberturas Ferruginosas Detrital-Lateríticas, compostas por aglomerados, lateritas, areia e argila. Os segmentos intermediários e mais elementos estão associados à dissecação do Grupo Canastra - Formação Paracatu com predominância de rochas como filito sericítico e filo carbonáceo. Estes transitam por segmentos mais baixos, planos e comuns, como a ocorrência de Depósitos Aluviais compostos por cascalho e areia (MOREIRA et al., 2008).



#fig1en.jpg

Figura 1 - Localização da área de pesquisa na margem direita do Distrito de São Firmino, afluente do Rio Cristalino São Marcos - GO.

Correlacionando a leitura e interpretação das obras de Resende (2016), Rosa e colaboradores (2018) e IBGE (2018), com variações morfométricas e morfográficas do terreno, destaca-se que as áreas mais altas e mais residentes têm predominância do Plintossolo (Concreção Pétrica), com textura variando de argilosa a pedregosa, seguida, por vezes, por segmentos abruptos como Leptossolo (Lítico Distrófico) de textura arenosa a pedregosa. Nas áreas mais baixas, há áreas mais planas, com predomínio de Ferralsol (Amarelo-Vermelho) e, na maior presença de Ferralsol (Vermelho), ambas distróficas e com textura variando de argilosa a muito argilosa. Indo para níveis mais baixos e dissecados, os Cambissolos (Haplics Distróficos) de textura argilosa predominam no meio, por vezes substituídos, quando em segmentos mais ingloriosos, os cabelos Leptossolo (Lítico Distrófico), também de textura arenosa a pedregosa, correndo em áreas mais isoladas. Por outro lado, há predomínio de Fluvisso (Distrófico) ao longo período da planície com baixo gradiente altimétrico e conectado à reserva.

Trata-se de uma bacia que, embora desenvolvida de forma muito desenvolvida, tem tendência ao alongamento, cuja evolução se dá através de reentradas na forma de anfiteatro escalonado resultante da associação entre o gradiente altimétrico inferior não sentido longitudinal e declividades altas não transversais. Segundo Monteiro (1951), o clima da região pode ser caracterizado como tropical semiúmido, com inverno seco, precipitação pluviométrica de 5,3 mm a 6,9 mm, de junho a julho, e temperatura média de 24,6 °C no mesmo período. O verão é quente e chuvoso, com temperaturas em torno de 30,3 °C no exterior e precipitação acumulada variando de 243,1 mm a 275,2 mm em janeiro e dezembro (SILVA; SANTANA; PELEGRINI, 2006). Compreende uma importante área de intenso uso pela agricultura, principalmente a agricultura de precisão.

METODOLOGIA

A avaliação da variabilidade espacial do manejo e conectividade de sedimentos compreende a relação espacial bivariada entre as estimativas de perda apenas dos resultados da aplicação do Universal Modified Loss of Loss (MUSLE), e o Índice de Conectividade (IC) das costas, como o canal de drenagem. A primeira indica a capacidade de geração, enquanto a segunda permite avaliar a capacidade de transporte dos sedimentos gerados a montante de um ponto, bem como sua continuidade a jusante, que pode apresentar

maior probabilidade de movimentação ou deposição. Portanto, a aplicação de ambos os procedimentos considerou a variabilidade espacial de fatores cumulativos, como condições de cobertura e uso do solo e erodibilidade isoladamente, bem como os factores cumulativos resultantes do efeito das variáveis, bem como a compressão da vazão e da área de contribuição. Estes implicam o comportamento de variáveis dependentes, como vazão e intensidade de vazão. Esta adaptação procura ter em conta o contributo hidrossedimentológico de cada zona específica, os efeitos cumulativos, de quantidade por jusante, bem como preservar os protocolos de aplicação do MUSLE, à escala do declínio, evitando que a extensão dos canais fluviais influencie os resultados, nomeadamente sobrestimando os valores finais.

VARIABILIDADE ESPACIAL DAS ESTIMATIVAS DE PERDA DE SOLO

Uma estimativa de perda apenas do manejo de sedimentos foi determinada usando o (MUSLE), conforme proposto por Williams (1975); Williams (1981) e Smith et al (1984). No presente trabalho, essa equação foi aplicada considerando a variabilidade espacial das variáveis independentes e dependentes, em uma escala de inclinação, com base na Equação 1:

$$Y = 11.8(Qqp)^{0.56} \cdot K LS CP \quad \text{Equation 1.}$$

[#form1en.jpg]

Onde: Y = perda estimada apenas de não evento de chuva, em toneladas; Q = volume em escoamento, em m³; qp = vazão máxima do evento pluviométrica, em m³/s; e os parâmetros convencionais K, LS, C e P USLE. Neste ponto, nota-se que a estimativa da perda apenas da USLE Modificada, tende a ser mais detalhada no espaço e no tempo, pois está diretamente relacionada às condições hidrológicas momentâneas, especialmente à variabilidade espacial do volume convertido na superfície e pico de vazão.

VARIABILIDADE ESPACIAL DAS ESTIMATIVAS DE ESCOAMENTO (Q) E PICO DE DESCARGA - QP

O volume convertido em escoamento superficial (Q) foi determinado a partir do produto da precipitação efetiva (Pe) pela área específica de contribuição. Portanto, foi adotado pelo Soil Conservation Service (SCS), o Natural Resource Conservation Service (NRCS) do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA) (NRCS, 2004), na determinação da precipitação efetiva ou altura de profundidade da água convertida no estuário. Esta proposta consiste na relação entre a precipitação resultante do evento pluviométrico e a capacidade de infiltração isoladamente, de acordo Equação 2:

$$Pe = \left[\frac{(P-0.2 S)^2}{(P+0.8 S)} \right], \text{ as long as } P \geq Ia = 0.2 S \quad \text{Equation 2.}$$

[#form2en.jpg]

onde: Pe = precipitação efetiva ou altura da vazão de água resultante, em mm; P = precipitação ou altura da chuva resultante do evento chuvoso, em mm; S = infiltração potencial do solo, em mm; e Ia => 0,2 S = abstração ou perda inicial considerada, em mm. Como observado na primeira parte da Equação 2, a precipitação efetiva considera uma perda inicial correspondente a 20% do potencial de infiltração devido à interceptação da vegetação, retenções microambientais, bem como outras formas de poluição ambiental.

Isso implica afirmar que chuvas com volume total inferior a 20% do potencial de infiltração do solo não proporcionam escoamento superficial.

Portanto, o total acumulado de precipitação resultante do evento pluviométrico considerado não presente foi determinado pela relação Intensidade-Duração-Frequência (IDF), proposta por Villela e Mattos (1975), através do levantamento obtido por Oliveira e colaboradores (2005) para o município de Cristalina, através da Equação

$$i = \frac{k \times TR^a}{(tc+b)^c} \Rightarrow i = \frac{878.213 \times TR^{0.2088}}{(t+12)^{0.7600}} \quad \text{Equation 3.}$$

[#form3en.jpg]

Onde: i = Intensidade máxima média de precipitação, mm por h; TR = tempo de retorno, em anos; t = tempo de concentração do escoamento superficial, em min; k , a , b e c são coeficientes de ajuste específicos para estações meteorológicas. Portanto, considerou-se um tempo de retorno de 25 anos, e um tempo de chuva igual ao tempo de concentração do escoamento superficial da referida bacia, que foi calculado com base na proposta de Watt e Chow (1985) Equação 4.

$$Tc = 7.68 (L/Sw^{0.5})^{0.79} \quad \text{Equation 4.}$$

[#form4en.jpg]

onde: Tc = tempo de concentração do escoamento superficial, em min; L = comprimento da linha de fluxo principal da bacia, em km; e Sw = declividade média da bacia em m/m.

Os valores de S foram estimados com base nos valores de CN (Curve Number) ou Flow Number, conforme proposto NRCS - USDA (2004), conforme apresentado na Equação 5.

$$S = \frac{25,400}{CN} - 254 \quad \text{Equation 5.}$$

[#form5en.jpg]

onde: S = infiltração potencial do solo, em mm; CN = Número de curvas, adimensionais; E 25400 e 254 são constantes provenientes do modelo. A relação entre tipos de cobertura e condições de uso do solo, tipos de somente (Grupos Hidrológicos) e sua correspondência em valores de NC é apresentada nas Tabelas 1 e 2.

O pico de vazão (qp) foi determinado a partir do produto resultante da precipitação efetiva na área de contribuição, distribuída na precipitação horária do hidrograma, que corresponde ao intervalo entre os picos de chuva e vazão, conforme proposta de Schwab e outros (1981), com base na Equação 6:

$$q_p = 0.0021 \times P_e \times A / T_p$$

Equation 6.

[#form6en.jpg]

Onde: Q_p = Vazão de pico do evento, em m^3/s ; P_e = precipitação efetiva ou parcela da precipitação disponível para escoamento superficial, em mm; A = área de contribuição, em ha; e T_p = horário de ponta do hidrógrafo, em horas. Na aplicação desta equação foi considerado um horário de pico correspondente a 0,6 do tempo de concentração para cada bacia através da Equação 7.

$$T_p = 0.6 \times T_c$$

Equation 7.

[#form7en.jpg]

DETERMINAÇÃO DOS GRUPOS HIDROLÓGICOS (GH) E DA ERODIBILIDADE DO SOLO (FATOR K)

Os Grupos Hidrológicos, bem como os valores de erodibilidade dos solos foram determinados com base na avaliação dos tipos de solo, nomeadamente textura e profundo.

Classe de Solo	Textura	Grupo Hidrológico*	Fator K**
CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico	Argilosa a média	C	0,0441
LATOSSOLO VERMELHO Distrófico	Muito argilosa a argilosa	B	0,0061
LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico	Argilosa	B	0,0081
NEOSSOLO FLÚVICO Tb Distrófico	Média a arenosa	A	0,0290
PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionário	Argilosa a cascalhenta	C	0,0438
NEOSSOLO LITÓLICO Distrófico	Arenosa a cascalhenta	D	0,0570

#tab1en.jpg

Tabela 1 - Classes de solos, texturas e suas correspondências em Grupos Hidrológicos e sua Erodibilidade. *

Adaptado de, Tucci (2008); Tucci e Marques (2001). ** Adaptado de Mannigel et al (2008); (2022).

Adaptado de Mannigel et al (2008); (2022).

O mapa de solos foi elaborado a partir da compilação e revisão dos mapeamentos existentes para a área (RESENDE, 2016; ROSA et al., 2018; IBGE, 2018), seguido de ajuste cartográfico, com base na morfometria e morfografia do relé, além de levantamentos adicionais de campo. Investigações. Os tipos de solo, sua correspondência em grupos hidrológicos e sua erodibilidade são apresentados na Tabela 1.

ELABORAÇÃO DO MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO E CÁLCULO DO FATOR TOPOGRÁFICO - FATOR LS

O cálculo do fator LS foi realizado com base na proposta metodológica de McCool et al (1987). Trata-se de uma adaptação do projeto clássico do fator derivado MUSLE para terrenos com declividades mais acentuadas, evitando a superestimação dos resultados devido a maiores declínios. Assim, o fator LS foi calculado com base na Equação 8.

$$LS = (L/22.13)^m (16.8 \operatorname{sen} \theta - 0.5) \quad \text{Equation 8.}$$

[#form8en.jpg]

onde: L = comprimento da rampa, em m; m = expoente adimensional, que foi calculado usando a Equação 9:

$$m = \frac{\operatorname{sen} \theta}{\operatorname{sen} \theta + 0.269(\operatorname{sen} \theta)^{0.8} + 0.05} \quad \text{Equation 9.}$$

[#form9en.jpg]

onde: θ = ângulo de inclinação, em graus, ou seja, $\theta = \operatorname{tangente}(s/100)$, onde s = inclinação em %. Assim, Fator S = 3,0 (sem θ) 0,8 + 0,56 (para compressões em rampa menores que 4 m); S = 10,8 $\operatorname{sen} \theta$ + 0,53 (para compressões em rampa maiores que 4 m e declivid menor que 9%); S = 16,8 $\operatorname{sen} \theta$ - 0,5 (para compressões em rampa maiores que 4 m e inclinação maior que 9%). O cálculo do fator LS foi aplicado apenas ao longo das encostas, para que os lineamentos do rio não influenciassem nos valores resultantes.

DETERMINAÇÃO DO FATOR DE USO/COBERTURA E GESTÃO DO SOLO (CP) E NÚMERO DA CURVA (CN)

O mapeamento das condições de uso e cobertura da terra busca conhecer os padrões fitofisionômicos do Cerrado (RIBEIRO; WALTER, 2008), e sua correspondência com os valores do fator PC, conforme adaptado de Stein et al (1987). Oliveira (2012), também procurou contemplar os efeitos decorativos da relação entre precipitação e comportamento isoladamente, como proposto por Tucci (2008) e Tucci e Marques (2001), resultando em valores de Número de Curva (NC). Por este método, os valores de NC variam de 0 (baixa capacidade de escoamento) a 100 (alta capacidade de escoamento). Vale ressaltar que o cálculo considerou o solo na condição de umidade antecedente III (AMC III), que considera um volume de chuva maior que 53 mm nos 5 dias anteriores. Por esta razão,

Classes de cobertura e condições de uso do solo	Grupos Hidrológicos				Fator CP**
	A	B	C	D	
	CN - Número de Escoamento*				
Agricultura - Terraceamento em nível	60	71	79	82	0,005775
Solo Exposto - com conservação	62	71	78	81	0,051365
Solo Exposto - sem conservação	72	81	88	91	1,000000
Pastagem - média e baixa transpiração	47	67	81	88	0,005000
Reflorestamento - média transpiração	36	60	70	76	0,016350
Florestas - densas e de alta transpiração	26	52	62	69	0,000040
Savanas - média transpiração	36	60	73	79	0,000700
Campos permanentes - média transpiração	36	60	73	79	0,000000
Água	0	0	0	0	0,000000

#tab2en.jpg

Tabela 2 - Condições de uso e cobertura do solo e seus respectivos valores, Número da Curva e fator CP. * Adaptado de, Tucci (2008); Tucci e Marques (2001). (1987); Oliveira (2012). (1987); Oliveira (2012).

ÍNDICES DE FLUXO E CONECTIVIDADE DE SEDIMENTOS - CI

O Índice de Conectividade – IC (índices de fluxo e conectividade de sedimentos) baseia-se na probabilidade de fluxo entre células, cujo gradiente permite a formação de lineamentos em uma matriz de dados. Para tanto, foi calculado com base na proposta de Borselli, Cassi e Torri (2008), que correlacionou dados observados em campo com estimativas obtidas por meio de modelagem de dados espaciais georreferenciados, também analisados e implementados no ambiente SIG por Cavalli e outros (2013) e também aplicados por Mishra et al (2019), por meio do Equação 10:

$$IC = \log_{10} \left(\frac{Dup}{Ddn} \right) = \log_{10} \left(\frac{\bar{W} \bar{S} \sqrt{A}}{\sum_{i=0}^{i=n} \frac{dn}{W_n S_n}} \right) \quad \text{Equation 10.}$$

[#form10pt.jpg]

Onde: Dup corresponde ao potencial de carreamento de sedimento produzido pela inclinação da enésima célula da matriz de dados, e o potencial da inclinação da célula é rebaixado. A relação entre os dois define o índice de conectividade (IC). Os componentes da célula vertical W = índice de rugosidade médio, adimensional (neste caso foi utilizado o fator USLE CP); S = média de dois gradientes, em m/m, ambos da área de contribuição (A em m²) para a célula n. Das componentes a jusante temos dn = comprimento do fluxo, em m; Wn = índice de rugosidade; e Sn = gradiente de inclinação, ambos referents à cell n da matriz de dados. Quanto à área mínima de contribuição, esta decorreu do tamanho da celular ou da resolução espacial do conjunto de matrizes utilizado (900 m²). A relação entre a raiz quadrada da área de contribuição e o comprimento do fluxo a montante torna o IC adimensional. Segundo Borselli, Cassi e Torri (2008), com aumento condicionado por valores sucessivos de IC+.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

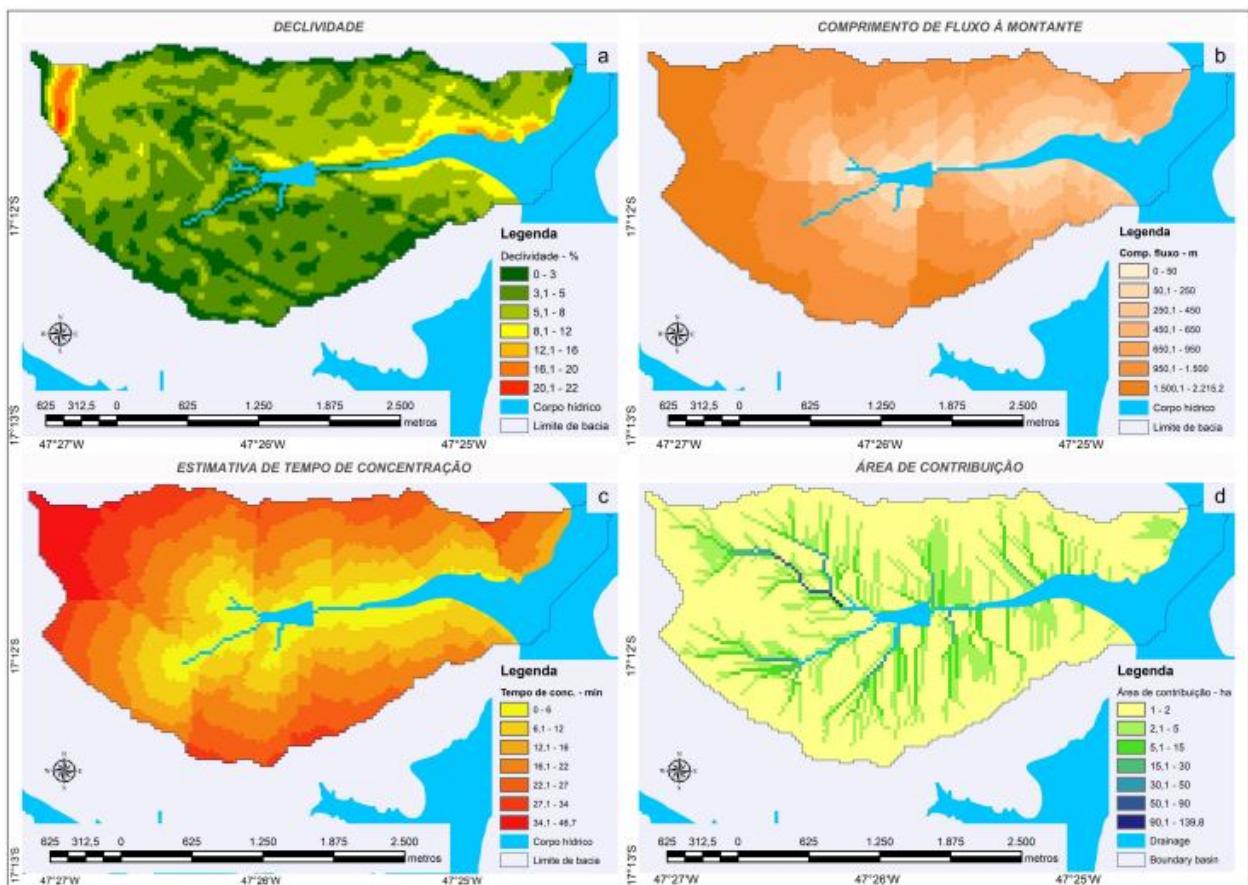
CARACTERÍSTICAS DO CONDICIONAMENTO MORFOMÉTRICO E SUA RELAÇÃO COM TIPOS DE SOLOS E DINÂMICA DE SEDIMENTOS

A configuração morfométrica da bacia neste estudo indica uma evolução mais acentuada no sentido longitudinal, tendo em vista o maior comprimento proporcionado pela cabeça das cabeças, onde o maior gradiente não foi no sentido transversal do canal de drenagem. O mapa de gradiente (Figura 2a) mostra a influência de três unidades geológicas no padrão de inclinação do talude.

A transição das litologias das Coberturas Detrital-Lateríticas (porção superior) do Grupo Canastra - Formação Paracatu (porção intermediária) para os Depósitos Aluviais é marcada por declínios mais acentuados. Essa transição indica diferenças no comportamento dos materiais que compõem cada unidade devido a diferentes processos de intemperismo.

Conseqüentemente, os ambientes menos desenvolvidos de Leptsolo (Distrófico) e Cambissolo (Haplic), enquanto uma unidade específica tende a resultar em costas menos agressivas e apenas mais espessas, como Ferralsol (Distrófico) e Ferralsolo (Amarelo-Vermelho).

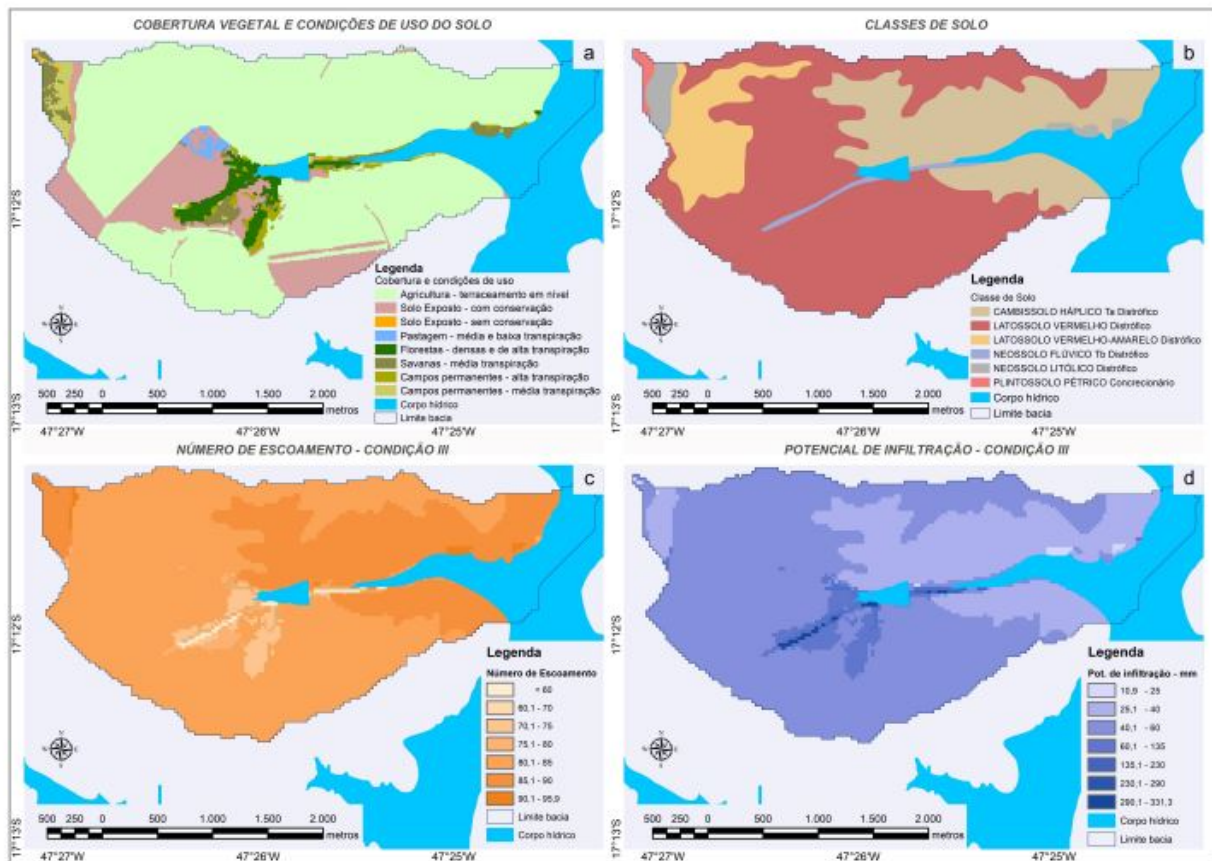
Uma das principais diferenças consiste em apenas as pessoas mais jovens provenientes de eros naturais, as mais desenvolvidas as mais desenvolvidas e, portanto, mais espessas, envolvem mais manejo de sedimentos quando mal manejadas. Nesse sentido, as áreas intrusivas (Figura 2a), associadas a menores compressões de fluxo (Figura 2b), são mais favoráveis à conectividade do fluxo, considerando o menor tempo que o escoamento (Figura 2c) leva para atingir o canal de drenagem. Por outro lado, os portos mais distantes e distantes, apesar do maior tempo de concentração do escoamento, também podem contribuir para a transferência de sedimentos por lineamentos de fluxo, que podem ser potencializados para aumentar a área de contribuição específica (Figura 2d).



#fig2en.jpg

Figura 2 - gradiente (parte a); Comprimento do fluxo a jusante (parte b); estimativa do tempo de concentração (parte c); e mapas de área de contribuição (parte d).

Em relação à dinâmica hidrológica, a associação de áreas de transição, com maiores gradientes (Figura 3b), tende a resultar em ambientes com maior CN (Figura 3c) e, portanto, com menor potencial de infiltração (Figura 3d).



#fig3en.jpg

Figura 3 - Utilização/cobertura isolada (parte a); tipos de solo (parte b); variabilidade espacial do CN (c); e mapas de potencial de infiltração (d).

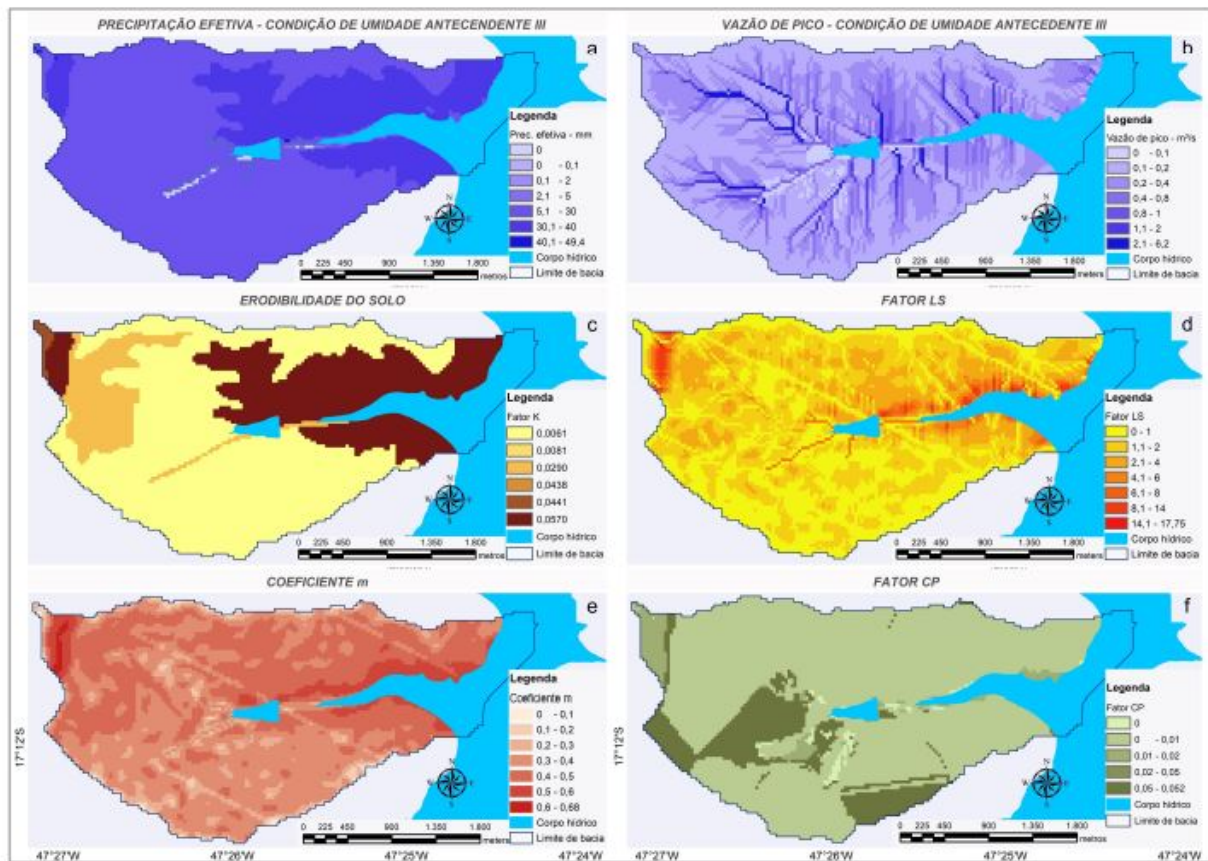
Esses ambientes, apenas esparsos, apresentam alto potencial de aceleração e intensificação de fluxos, que convergem lateralmente e se aprofundam linearmente, aumentando a probabilidade de processos erosivos em trechos caracterizados como rampas coluviais, que apresentam pouca resistência à energia cinética proveniente da intensificação do escudo superficial.

Os ambientes com menores valores de CN e maior potencial de infiltração estão localizados nas porções mais baixas. Parte-se da mesma unidade litológica (depósitos aluviais), com baixos gradientes, apenas os mais espessos devido aos maiores volumes de materiais detritais depositados e, principalmente, remanescentes de vegetação. Embora esses ambientes sejam favoráveis a processos de infiltração e deposição de sedimentos, a ausência de vegetação pode permitir a transferência direta para o canal fluvial ou reservatório.

RELAÇÃO CHUVA-ESCURSO, ERODIBILIDADE DO SOLO, FATOR TOPOGRÁFICO, COBERTURA DA ÚNICA E PRÁTICAS CONSERVACIONISTAS EM ESTIMATIVAS DE ENTRADA DE SEDIMENTOS

Considerando a relação entre as compressões de fluxo e a declividade média da bacia e seu tempo de concentração da escola resultante (WATT; CHOW, 1985), chegamos a uma estimativa de 46,7 minutos para toda a área da bacia que poderia contribuir para a pontuação, resultando em uma vazão máxima de convergência. Considerando esse tempo na relação Intensidade-Duração-Frequência, houve uma intensidade máxima de chuva de 77,56 mm/h, o que resultou em uma altura estimada de 60,36 mm. Esse período, dada a variabilidade isolada do potencial de infiltração, resultou em uma precipitação efetiva variando de 40,1 mm a 49,4 mm em áreas com maior gradiente e menos desenvolvidas isoladamente. Em

áreas de gradientes mais baixos, com apenas as mais desenvolvidas, Ferralsol (Vermelho Distrófico e Vermelho-Amarelo), os valores variam de 5 mm a 40 mm. Adjacente,



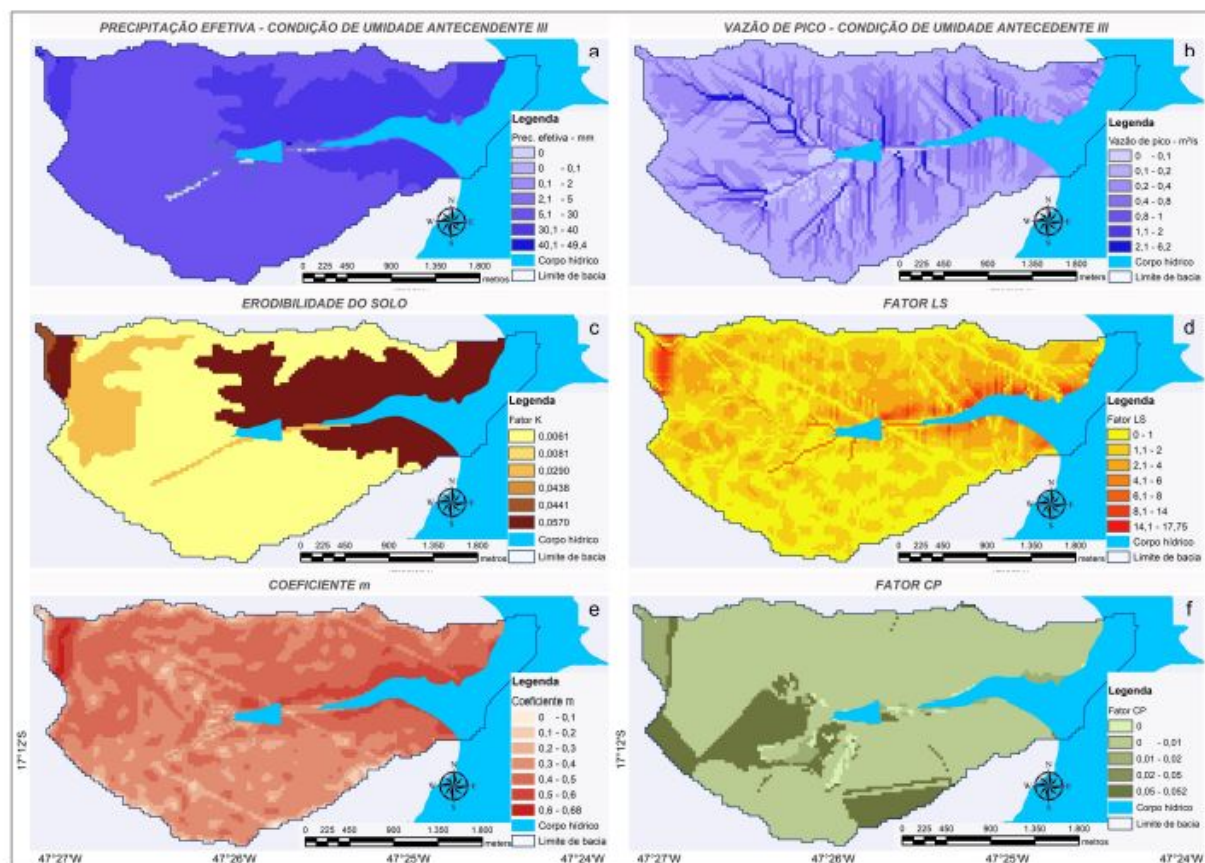
#fig4en.jpg

Figura 4 - Variabilidade espacial dos fatores MUSLE: precipitação efetiva (a); pico de fluxo (b); erodibilidade do solo (c); coeficiente m (d); fator LS (e); e mapas de fator CP (f).

A variabilidade espacial da precipitação efetiva associada ao aumento da área de contribuição específica resultou em um pico predominante de $0,26 \text{ m}^3/\text{s}$, excepcionalmente pôde ser observado a $6,2 \text{ m}^3/\text{s}$ no pico de maior concentração de precipitação pluviométrica (Figura 4b), localizado dentro da área de contribuição específica máxima (139,8 ha). Em relação ao mapa de erodibilidade simples (Figura 4c), destaca-se a incidência de vazões com vazão de $0,8 \text{ m}^3/\text{s}$ em solos com alto K fator, como o Cambissolo (Distrófico) de textura média, e o Leptsolo (Distrófico) com texturas variando de arenoso a pedregoso. O alto potencial de perda só é confirmado em áreas marcadas por vazões de pico elevado, bem como fatores LS elevados, cujos valores mais elevados se concentram próximos à planície fluvial ou ao canal de drenagem.

RELAÇÃO BIVARIADA ENTRE A ENTRADA ESTIMADA DE SEDIMENTOS E O ÍNDICE DE CONECTIVIDADE

O resultado da variabilidade espacial, em particular o efeito cumulativo do condicionamento MUSLE variáveis, bem como do IC ao longo das encostas, pode ser visto na Figura 5. Observa-se que as estimativas de perda só foram mais acentuadas a partir de dois trechos intermediários de encostas, intensificando em função do aumento do fator LS, que até seus valores máximos próximo ao canal de drenagem ou reservatório. A estimativa máxima de entrada de sedimentos atinge, excepcionalmente, 25,54 toneladas da maior área específica de entrada, o que proporciona concentração máxima de volume de escoamento superficial e pico de vazão, associada à predominância de altos valores do fator CP. Além dessa situação, vale destacar também o maior número de áreas com perdas estimadas apenas entre 1 e 10 toneladas.



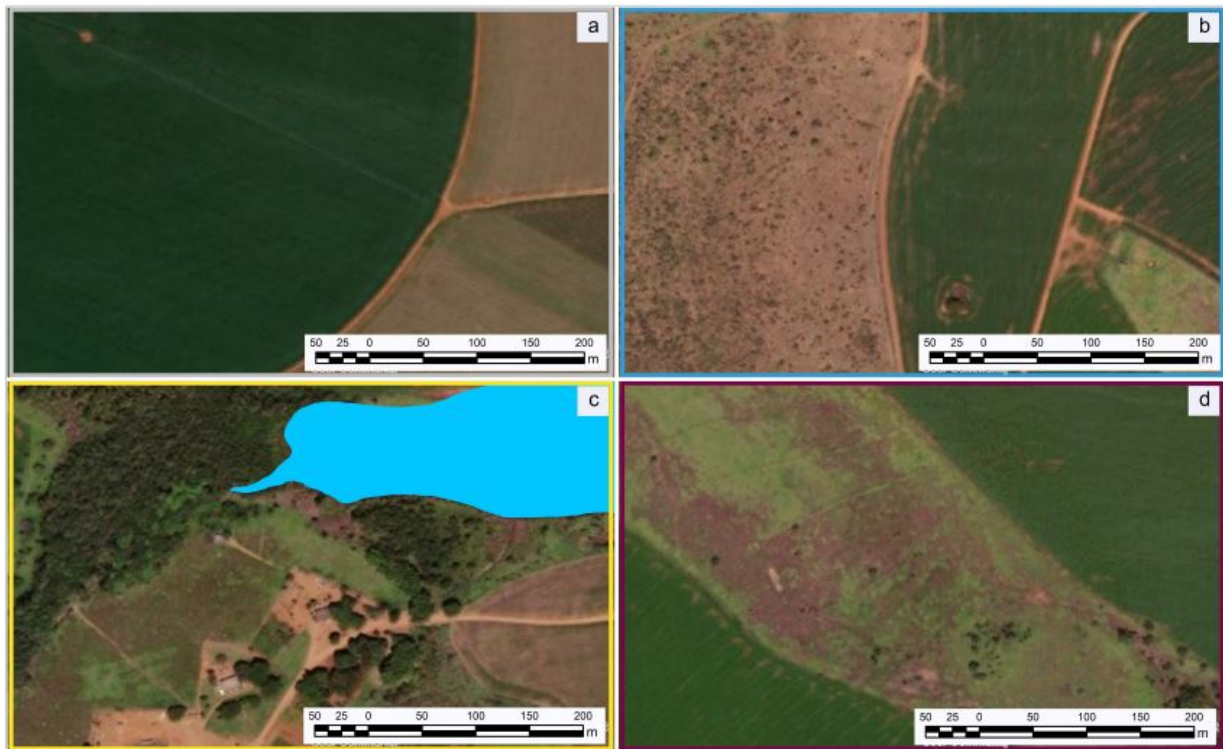
#fig5en.jpg

Figura 5 - Gerenciamento estimado de sedimentos (parte a); Índice de Conectividade (Parte B); e Mapas de Relacionamento Bivariados (Parte C).

Essa perda começa nos segmentos intermediários e vai até as cercanias da planície. Essa perda também está associada a linhas de fluxo mais intensas. Essas situações, que acabam acompanhando apenas os trechos estimados de baixa perda, indicam áreas críticas na zona térmica de manejo e aporte de sedimentos. Isso porque esses trechos estão espacialmente correlacionados com o índice máximo de conectividade dos derramamentos com canais de drenagem, conforme ilustrado na Figura 5b, o que implica no efeito cumulativo e, conseqüentemente, na transferência de sedimentos da vertical para o solo.

Com base na mesma figura é possível perceber que esses ambientes são eventualmente sucedidos por trechos com estimativas de baixa perda de solo. Esses ambientes correspondem ao planejamento fluvial, que se caracteriza pela redução do gradiente, formando segmentos côncavos e, conseqüentemente, menor fator LS. Porém, vale ressaltar que esses mesmos ambientes estão sob efeito de intenso escoamento superficial a montante, o que implica em alto índice de conectividade. Isso sugere que esses fluxos intensos acabam mobilizando os sedimentos naturalmente depositados ao longo das planícies, deslocando o comprimento do canal ou reserva de drenagem.

Nesse sentido, entende-se que o potencial de perda de sedimentos em sistemas hidrográficos deve ser interpretado sob uma perspectiva dinâmica, considerando as especificidades de cada modelo utilizado. Uma visa estimar a desagregação e, conseqüentemente, a perda de solo, enquanto a outra indica a maior ou menor facilidade de mobilização dos sedimentos gerados. No contexto do levantamento, entende-se que as áreas demarcadas em marrom são aquelas marcadas em amarelo e imediatamente precedidas por segmentos em azul que são consideradas áreas críticas quando são responsáveis pelo manejo e contribuição de sedimentos para o canal de drenagem ou para a reserva.



#fig6pt.jpg

Figura 6 - Imagens representativas das quatro principais localizações da bacia no estudo: manejo e conectividade de sedimentos (parte a); Alta Geração de Sedimentos e Baixa Conectividade (Parte B); Baixa Geração de Sedimentos e Alta Conectividade (Parte C); e Alta Geração de Sedimentos e Alta Conectividade (Parte D).

6 apresenta a situação de cada ambiente com mais detalhes em termos de abrangência, práticas de manejo e evidências de processos erosivos. O ângulo indicado com baixo índice de conectividade de sedimentos é caracterizado por baixa concentração de fluxo, solos argilosos, baixo fator LS e, portanto, maior tempo de viagem até os canais ou reserva, e sua utilização na agricultura e práticas de manejo (Figura 6a). O ambiente representativo de alta perda de apenas e baixo índice de conectividade é marcado por vazão mais acentuada, baixos níveis de desempenho, alta taxa de LS, alta distância e tempo de percurso até o canal e reserva, com a condição de exposição única (Figura 6b). Para o ambiente com baixo índice de conectividade, é marcado por uma vazão reduzida do plano com remanescentes de vegetação, apenas o mais profundo no fluxo de acúmulo de materiais, baixo em LS fator e imediatamente próximo ao canal de drenagem, bem como à reserva (Figura 6c). O segmento marcado por alta perda de apenas e alto índice de conectividade é caracterizado por grande área aportada e, conseqüentemente, alta intensidade de fluxo, isoladamente com erodibilidade variando de média a alta, LS variando de média a alta, próximo ao canal de drenagem ou à reserva, e com condições (Figura 6d).

CONCLUSÃO

A relação entre a variabilidade espacial das estimativas de perda de apenas uma e o índice de conectividade é apresentada, com considerável precisão, para a ocorrência de áreas com diferentes níveis de crítica em termos de produção e contribuição de sedimentos. Embora seja uma relação bivariada que representa dois aspectos de grande importância na produção e contribuição de sedimentos, também deve ser interpretada em uma perspectiva dinâmica de cada zona como os seis segmentos, tanto em adição quanto no caso, que condicionam a desagregação e deslocamento de sedimentos. Os resultados reforçam a necessidade de monitoramento das práticas de manejo nas áreas com maior produção estimada de sedimentos, bem como a reposição da vegetação nas planícies mais próximas.

A avaliação da variabilidade espacial das estimativas de produção sedimentar e conectividade permite a representação de dois processos muito importantes em um único plano de informação. Dessa forma, brinda um entendimento mais completo, detalhado, dinâmico e, portanto, mais propício para a toma de decisão. Isso ocorre mesmo no caso de grandes bacias de contribuição, permitindo o planejamento e aplicação de recursos em áreas prioritárias e, conseqüentemente, o aumento da possibilidade de intervenções más efficientes.

CONFIRMAÇÕES

Este trabalho faz parte do projeto de P&D "Modelage em Diferentes Escalas de Geração de Sedimentos em Erosão e Entrega de Sedimentos em Reservatórios de UHEs" - PD-0394-1705/2017, regulamentado pela Agência Nacional de Energía Elétrica - ANEEL, desenvolvido pela Eletrobras FURNAS, Universidade Federal de Goiás e Universidade de Brasília.

REFERÊNCIAS

- Oliveira, A.; OLIVEIRA, A.; ROSTAMIZAD, G. Aplicação da equação universal modificada de perda de solo (MUSLE) na previsão da produção de sedimentos (case study: Kengir hydrographic basin, Irã). *Jornal Árabe de Geociências*. v. 5º. n. 6º. pág. 1259 - 1267. 2011. <https://doi.org/10.1007/s12517-010-0271-6>.
- BENAVIDEZ, R. et al. Uma revisão da (Revisada) Equação Universal de Perda de Solo (RUSLE): com vistas a aumentar sua aplicabilidade global e melhorar as estimativas de perda de solo. *Hidrologia e Sistema Terrestre Ciências*, v. 22, p. 6059 - 6086, 2018. <https://doi.org/10.5194/hess-22-6059-2018>.
- OLIVEIRA, A.; Oliveira, P.; TORRI, D. Prolegômenos para conectividade de sedimentos e escoamentos na paisagem: uma avaliação numérica de SIG e campo. *Catena*, v. 75, p. 268 - 277, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2008.07.006>.
- CAVALLI. M. e col. Avaliação geomorfométrica da conectividade espacial de sedimentos em pequenas bacias alpinas. *Geomorfologia*, v. 188, p. 31 - 41, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.05.007>.
- COLMAN, C. B. et al. Diferentes abordagens para estimar a produção de sedimentos em uma bacia hidrográfica tropical. *Revista Brasileira de Recursos Águas*, v. 23, e. 47, p. 1 - 9, 2018. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.231820170178>.
- CORRÊA, C. M. C.; CRUZ, J. Erosão real e estimada através da RUSLE em estradas florestais, em relevo ondulado a fortemente ondulado. *Revista Árvore*. V. 34, n. 4, p. 587 - 595, 2010. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622010000400003>.
- EZZAOUINI, M. A. et al. Comparação do modelo MUSLE e dois anos de medição do transporte de sólidos, na Bacia de Bouregreg, e impacto na sedimentação no reservatório Sidi Mohamed Ben Abdellah, Marrocos. *Água*, v. 12, n. 1882, p. 1-27, 2020. <https://doi.org/10.3390/w12071882>.
- HARMON, B. A. et al. s.sim.terrain 1.0: um modelo de evolução de paisagens com hidrologia dinâmica. *Desenvolvimento de Modelo Geocientífico*. v. 12, p. 2837-2854. 2019. <https://doi.org/10.5194/gmd-12-2837-2019>.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Mapeamento de recursos naturais do Brasil escala 1:250.000. Documentação técnica geral, 2018, 8 p. Disponível eme. Acesso em 10 de fevereiro de 2021.
- PEREIRA JÚNIOR, LC; FERREIRA, N.C.; MIZIARA, F.; A expansão da irrigação por pivôs centrais no estado de Goiás (1984 - 2015). *Boletim Goiano de Geografia*, v. 37, nº. 2º, págs. 323 - 341, 2017. <https://doi.org/10.5216/bgg.v37i2.49158>.
- KITAHARA, H. et al. Aplicação da Equação Universal de Perda de Solo (USLE) em Florestas Montanhosas no Japão. *Revista de Pesquisa Florestal*, v. 5, p. 231 - 236, 2002. <https://doi.org/10.1007/BF02767115>.
- OLIVEIRA, P. S.; OLIVEIRA, T. V.; PRASAD, M. A. Simulação de sedimentos Yeld sobre estações não calibradas utilizando MUSLE e Fuzzy Model. *Procedia Aquática*, v. 4, p. 1291 - 1298. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.168>.
- Problemas de sedimentos e estratégias para seu manejo - Experiência de várias bacias hidrográficas de grande porte. Programa Hidrológico Internacional - UNESCO. Paris: UNESCO, 2017. 16 págs.
- MANNIGEL, A. et al. Fator erodibilidade e tolerância de perda dos solos do Estado de São Paulo. *Acta Scientiarum Agronomia*, v. 24, n. 5, p. 1335 - 1340. 2002. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v24i0.2374>

- MCCOOL, D. K. et al. Fator de declividade revisado para a Equação Universal de Perda de Solo. *Transações da American Society of Agricultural and Biological Engineers - ASAE*. v. 30, n. 5, p. 1387-1396. 1987. <https://doi.org/10.13031/2013.30576>.
- MISHRA, K. e col. Rumo à avaliação da conectividade de sedimentos em uma grande bacia hidrográfica do Himalaia. *Ciência do Ambiente Total*. v. 661. p. 251 - 265. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.118>.
- MITASOVA, H. et al. Modelagem do potencial topográfico de erosão e deposição utilizando SIG. *Revista Internacional de Sistemas de Informação Geográfica*, v. 10, n. 5, p. 629 - 641, 1996. <http://dx.doi.org/10.1080/02693799608902101>.
- MITASOVA, H. et al. In: João F. Shroder (Ed). *Tratado de Geomorfologia*, v. 3, p. 228-258. San Diego: Imprensa Acadêmica. 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-374739-6.00052-X>.
- MONTEIRO, C. A. F. Notas para o estudo do clima do Centro-Oeste Brasileiro. *Revista Brasileira de Geografia*, p. 22 - 45, jan - mar, 1951.
- MOREIRA, M. L. O. et al. *Geologia do estado de Goiás e Distrito Federal: texto explicativo do mapa geológico do estado de Goiás e Distrito Federal*. Goiânia: CPRM; SIC - FUNMINERAL, 2008. 143 págs.
- MORRIS, G. L. Classificação de alternativas de manejo para combater a sedimentação de reservatórios. *Água*, v. 12, n. 861, p. 1 - 24, 2020. <https://doi.org/10.3390/w12030861>.
- NRCS - Serviço Nacional de Conservação de Recursos. Estimativa do escoamento direto das chuvas das tempestades. *Manual Nacional de Engenharia*, capítulo 10. Washington D.C.: Departamento de Agricultura, USDA, 2004. 79 págs.
- Contribuição Metodológica para a Avaliação da Geração e Transporte de Sedimentos em Sistemas Hidrográficos Tropicais. *Água*, v. 14, n. 4091, p. 1-15, 2022. <https://doi.org/10.3390/w14244091>
- OLIVEIRA, L. F. C. et al. Intensidade-duração-freqüência de chuvas intensas para localidades do estado de Goiás e Distrito Federal. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, Goiânia, v. 35, n. 1, p. 13-18, 2005.
- OLIVEIRA, J. S. Avaliação de modelos de elevação na estimativa de perda de solos em ambiente SIG. 2012. 103 p. Dissertação - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz - Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.
- PHUONG. T. T.; RIBEIRO, R. P.; CHUONG, H. V. Simulação do risco de erosão do solo na área a montante da bacia hidrográfica do rio Bo - Capítulo 6. In: SHIVAKOTI, G. P. et al. *Redefinição da diversidade e dinamismo da gestão de recursos naturais na Ásia*. Amsterdã: Elsevier, 2017. pág. 87 - 100. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805452-9.00006-0>.
- RESENDE, M. J. G. *Classes de solos dos municípios goianos - 2016*. Goiânia: Emater - Agência Goiana de Assistência Técnica, Extensão Rural e Pesquisa Agropecuária, 2016. 57 págs.
- RIBEIRO, J. F.; WALTER, B. M. T. As principais fitofisionomias do bioma Cerrado. In: SANO, S. M.; ALMEIDA, S. P.; RIBEIRO, J. F. (Org.). *Fechado: ecologia e flora*. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2008. Cap. 6, p.151-212.
- ROSA, L. E. et al. Atributos para mapeamento digital de solos: o estudo de caso na bacia do ribeirão Arrojado, município de Cristalina - Goiás. In: OLIVEIRA, A. C. (Org.). *Elementos da natureza e propriedades do solo*. Ponta Grossa: Atena Editora. 2018. pág. 69 - 82. <https://doi.org/10.22533/at.ed.653182002>.
- SADEGHI, S. H. R. et al. Uma revisão da aplicação do modelo MUSLE em todo o mundo. *Revista de Ciências Hidrológicas*. v. 59. n. 2º. p. 365 - 375. 2014. <https://doi.org/10.1080/02626667.2013.866239>.
- SCHWAB, G. O. et al. *Engenharia de conservação de solo e água*. Nova Iorque: Wiley, 1981. Pág. 525.
- STEIN, D. P. et al. Potencial erosivo lamelar natural e antrópico na bacia do Peixe-Paranapanema. In: *Simpósio Nacional de Controle de Erosão*, 4, Marília, 1987. Anais, Marília, p. 105-135.

- SILVA, V. C. Estimativa da erosão atual da bacia do rio Paracatu (MG/GO/DF). *Pesquisa Agropecuária Tropical*, v. 34, n. 3, p. 147 - 159, 2004. <https://doi.org/10.5216/pat.v34i3.2308>
- SILVA, S. C.; SANTANA, N. M. P.; PELEGRINI, J. C. Caracterização Climática do Estado de Goiás. Goiânia: Secretaria de Indústria e Comércio, Superintendência de Geologia e Mineração, 2006. 133 págs.
- SILVA, S. J. et al. Predição da produção de sedimentos de Campos das Planícies do Sul com a Equação Universal de Perda de Solo Modificada. *Revista Ecologia de Pastagens e Gestão*. v. 37. n. 4, p. 294-297. 1984.
- THOMAS, K. et al. Avaliação do modelo SEDiment Delivery Distributed (SEDD) na bacia hidrográfica do reservatório de Shihmen. *Revista Sustentabilidade*, n. 12, v. 6221, p. 1 - 22, 2020. <https://doi.org/10.3390/su12156221>.
- OLIVEIRA, C. E. M.; MARQUES, D. M. L. da M. Avaliação e controle da drenagem urbana. Porto Alegre: UFRGS, 2001. 558 págs.
- TUCCI, C. E. M. Águas urbanas. *Estudos avançados*, São Paulo, v. 22, n. 63, p. 97-112, 2008.
- OLIVEIRA, A. M.; MATTOS, A. Hidrologia Aplicada. São Paulo: McGrawHill do Brasil. 1975. 245 págs.
- OLIVEIRA, A. E.; CHOW, K. C. A. Uma expressão geral para o tempo de defasagem da bacia. *Revista Canadense de Engenharia Civil*. v. 12, n. 2, p. 294-300.1985. <https://doi.org/10.1139/l85-031>
- WILLIAMS, J. R. Predição da produção de sedimentos com equação universal utilizando fator de energia de escoamento. In: USDA-ARS, ed. *Tecnologia atual e prospectiva para previsão de produção e fontes de sedimentos*. Washington, 1975. p. 244 - 252.
- WILLIAMS, J. R. Testando a Equação Universal de Perda de Solo modificada. In: *Anais do Workshop de Estimativa de Erosão e Rendimento de Sedimentos em Pastagens. Manuais e Revisões Agrícolas - W-26*. Arizona: USDA, 1981. p. 157-164.