

Mapeamento da erodibilidade e erosão potencial do solo em uma bacia hidrográfica de encosta

Mapping of erodibility and potential soil erosion in a hillside watershed

Pablo Miguel^{1*} , Ricardo Simão Diniz Dalmolin² , Jean Michel Moura-Bueno² ,
Maurício Fornalski Soares¹ , Henrique Noguez da Cunha² , Renata Pinto Albert¹ ,
Lizete Stumpf¹ , Jeferson Diego Leidemer¹ 

RESUMO

O objetivo deste estudo foi estimar o potencial de perda de solo por meio da equação universal de perda de solo e identificar os fatores que controlam o processo erosivo em uma bacia hidrográfica de encosta. O fator erosividade da chuva (R) foi calculado por meio de dados normais de precipitação, obtendo-se, assim, índices mensais de erosão. O fator erodibilidade do solo (K) foi obtido a partir de uma amostragem de solo realizada por meio de uma malha de 340 pontos, na qual os valores foram interpolados pelo método da krigagem ordinária. O fator topográfico (LS) foi gerado a partir do Modelo Digital de Elevação (MDE), já os fatores uso e manejo e práticas conservacionistas (CP) foram obtidos por meio de observações de campo e valores tabelados. As maiores taxas de perdas abrangem 27% da área e se concentram em locais de maiores declividades nos quais predominam solos rasos, como Neossolos Litólicos e Neossolos Regolíticos. O fator LS determinou a magnitude do processo erosivo e o fator CP apresentou a maior relação com o controle das perdas de solo. Os resultados encontrados mostram a importância do fator cobertura do solo, em que medidas de manutenção da vegetação e práticas conservacionistas devem ser adotadas e consideradas pelos gestores ambientais em regiões de encosta com predomínio de solos rasos associados a relevo declivoso.

Palavras-chave: equação universal de perda de solo; solos de encosta; textura do solo; topografia complexa; práticas conservacionistas.

ABSTRACT

The objective of this study was to estimate the soil loss potential through the universal soil loss equation and to identify the factors that control the erosive process in a hillside watershed. Rainfall erosivity factor (R) was calculated through normal precipitation data, thus obtaining monthly erosion indexes. The soil erodibility factor (K) was obtained from a soil sampling in an irregular grid of 340 points, in which the values were interpolated by the ordinary kriging method. The topographic factor (LS) was generated from the Digital Elevation Model (MDE) and the use and management and conservationist practices factors (CP) through field observations and tabulated values. The highest loss rates cover around 27% of the area, and are concentrated in places with higher slopes where shallow soils such as Litolics Neossols and Regolithic Neossols predominate. The LS factor determined the magnitude of the erosive process and the CP factor showed the highest relation with the soil loss control. The results found show the importance of the cover-management factor, in which measures of vegetation maintenance and conservation practices should be adopted and considered by the environmental managers in hillside regions with predominance of shallow soils associated to slope relief.

Keywords: universal soil loss equation; hillside soils, soil texture; complex topographic; conservationist practices.

INTRODUÇÃO

A erosão do solo, quando em processo acelerado, constitui sério problema de degradação desse recurso natural, com forte impacto na segurança alimentar, na resiliência da biodiversidade e na manutenção dos sistemas produtivos (PANAGOS *et al.*, 2017; WANG *et al.*, 2016), principalmente na região dos trópicos úmidos associada à topografia acidentada e à elevada precipitação (PANAGOS *et al.*, 2017).

No Brasil, a erosão causada pela água da chuva é a forma mais significativa de degradação do solo, com estimativa do volume de solo perdido anualmente

na ordem de 500 milhões de toneladas (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2010), variando de 0,1 até 136,0 t ha⁻¹, conforme o uso e a cobertura da terra (ANACHE *et al.*, 2017). Nesse sentido, Dechen *et al.* (2015) observaram que um solo com 90% de cobertura reduz as perdas médias de água, solo e matéria orgânica em mais de 50%, quando comparado a um solo descoberto, bem como os custos de erosão do solo associados à perda de fertilizantes para as taxas de 0 e 90% de cobertura do solo são estimados, respectivamente, em US\$ 107,8 e US\$ 18,1 por ha⁻¹ ano⁻¹.

¹Universidade Federal de Pelotas - Pelotas (RS), Brasil.

²Universidade Federal de Santa Maria - Santa Maria (RS), Brasil.

*Autor correspondente: pablo.ufsm@gmail.com

Conflitos de interesse: os autores declaram não haver conflito de interesses.

Financiamento: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

Recebido: 11/09/2018 - Aceito: 12/09/2019 - Reg. ABES: 20190235

O processo erosivo acelerado, no geral, é decorrente do manejo inadequado, principalmente em áreas de lavoura, pela falta de organização de vias de acesso e ausência de práticas conservacionistas (MIGUEL *et al.*, 2014). Segundo Didoné *et al.* (2014), a falta de práticas conservacionistas em áreas de lavoura no estado do Rio Grande do Sul é a principal causa do processo erosivo acelerado e, conseqüentemente, da produção de sedimentos. Assim, o mapeamento detalhado do processo erosivo e a caracterização da extensão e da magnitude das taxas atuais de erosão do solo (WEILL; SPAROVEK, 2008; BESKOW *et al.*, 2009) se tornam ferramenta imprescindível para a definição de práticas conservacionistas adequadas para minimizar as perdas de solo, bem como para a realização de diagnóstico ambiental, principalmente em âmbito de bacia hidrográfica (TIECHER *et al.*, 2017).

A Equação Universal de Perda de Solo (EUPS) é um modelo matemático que utiliza informações do meio físico para estimar a erosão em escala de bacia hidrográfica (WISCHMEIER; SMITH, 1978). No entanto, a maior parte das pesquisas que aplicam essas equações para estimar as perdas de solo é executada em áreas com relevo suave a ondulado e com predomínio de solos profundos (ANACHE *et al.*, 2017; DURÃES; MELLO, 2016). Há poucos estudos no Brasil de solos em áreas com relevo acidentado e predomínio de solos rasos (MOURA-BUENO *et al.*, 2018), indicando que em bacias hidrográficas de encosta há a necessidade de estudos que quantifiquem o potencial erosivo e identifiquem os fatores os fatores que regulam a magnitude das taxas de perda de solo dessas áreas. Dessa forma, o objetivo

deste estudo foi estimar o potencial de perda de solo por meio da equação universal de perda de solo e identificar os fatores que controlam o processo erosivo em uma bacia hidrográfica de encosta.

METODOLOGIA

Caracterização da área

O estudo abrange uma área de aproximadamente 20 km² da Bacia Hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim, localizada no Rebordo do Planalto do estado do Rio Grande do Sul (RS), Brasil (Figura 1). A bacia ocupa parte dos municípios de Santa Maria e Itaara, sendo responsável por 30% do abastecimento de água do município de Santa Maria (RS). O clima da região, segundo classificação de Köppen, é Cfa (subtropical úmido, sem estação seca definida), com precipitação média anual de 1.700 mm. A área apresenta relevo complexo, sendo que nas altitudes mais elevadas estão localizadas as nascentes e ocorre o predomínio de rochas vulcânicas e solos mais desenvolvidos. Nas altitudes intermediárias ocorre uma mistura de rochas vulcânicas e sedimentares associadas a relevo forte ondulado a montanhoso. Já em altitudes mais baixas ocorrem, predominantemente, rochas sedimentares e o relevo varia de suave ondulado a ondulado.

O mapeamento de solos da bacia hidrográfica mostra o predomínio de Neossolos Litólicos (50% da área), seguidos de Argissolos Bruno-Acinzentados

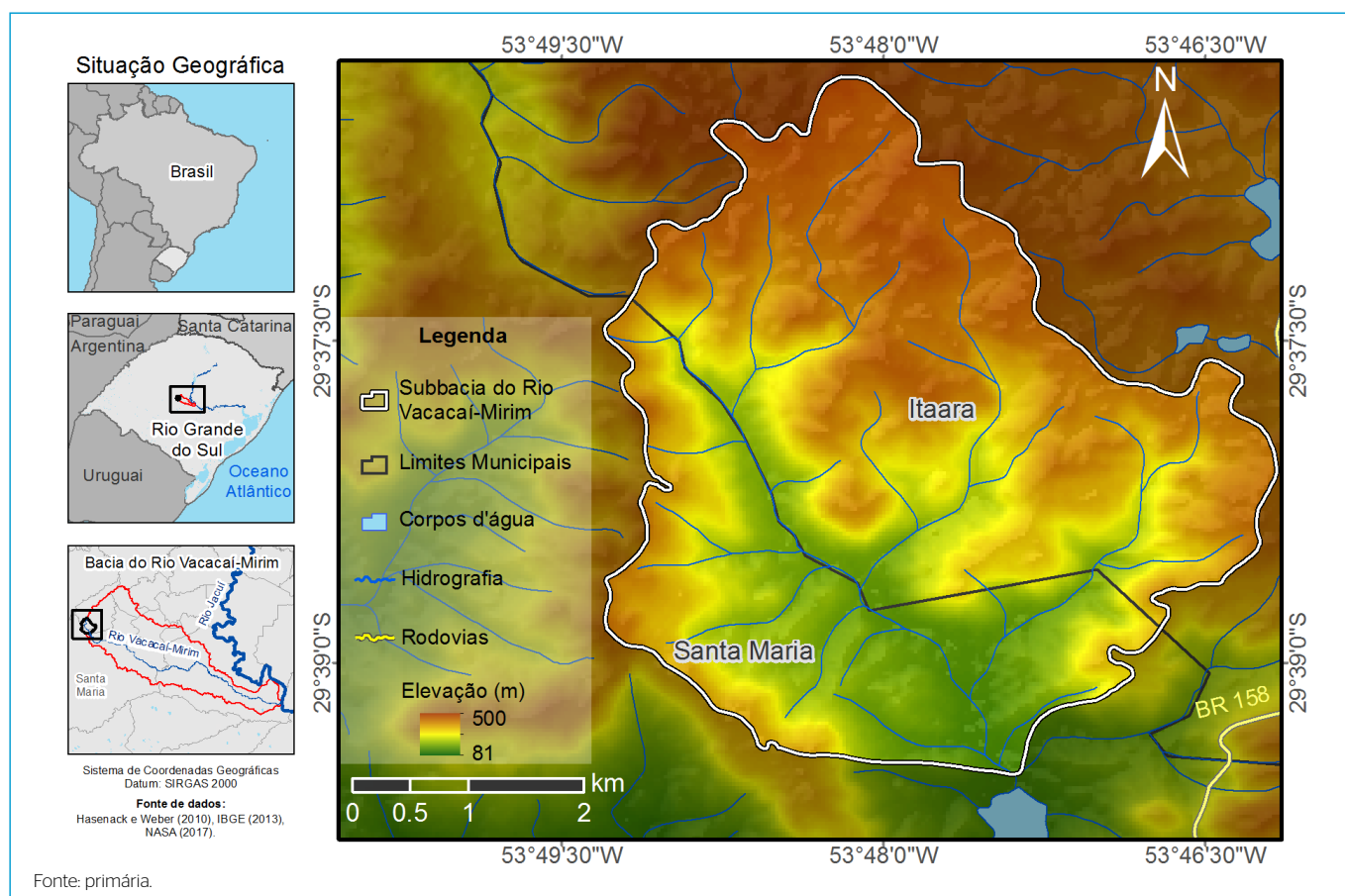


Figura 1 - Situação geográfica da Bacia Hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim/Rio Grande do Sul.

(14%), associação de Cambissolos-Neossolos (14%), Argissolos Vermelhos (12%) e pequenas áreas com Planossolos Háplicos e associações de Neossolos Litólicos e Neossolos Regolíticos (MIGUEL *et al.*, 2011) (Figura 2A). Em altitudes mais elevadas ao norte da área predominam solos de textura argilosa. Já em altitudes intermediárias predominam solos rasos com textura média e em altitudes mais baixas predominam solos profundos de textura média a arenosa. Mais de 50% da área não apresenta aptidão para lavouras com cultivos anuais de grãos, pastagens plantadas ou áreas de reflorestamento, sendo somente indicada para a preservação da fauna e da flora.

Equação universal de perda de solo

A EUPS é um modelo empírico que estima a erosão hídrica concentrada e distribuída por meio de fatores que afetam o processo erosivo, como a erosividade da chuva, a erodibilidade dos solos, a topografia e o uso e manejo da terra (RUHOFF *et al.*, 2006). É aplicada em nível de parcelas de perda de solo padrão e estima a taxa média anual de perda de solo (WISCHMEIER; SMITH, 1978). Utilizando-se ferramentas de sistema de informação geográfica (SIG), pode ser usada em nível de bacia hidrográfica (BESKOW *et al.*, 2009), sendo útil para modelar áreas complexas (DURÃES; MELLO, 2016). A expressão da equação se dá por uma combinação linear dos fatores que influenciam o processo erosivo (WISCHMEIER; SMITH, 1978), conforme a Equação 1:

$$A = R \times K \times LS \times CP \quad (1)$$

Em que:

A = taxa anual média de erosão do solo por unidade de área ($Mgha^{-1}ano^{-1}$);

R = fator erosividade média anual das chuvas ($MJ\ mm\ ha^{-1}h^{-1}ano^{-1}$);

K = fator erodibilidade dos solos ($t\ h\ MJ^{-1}mm^{-1}$);

LS = fator topográfico, obtido a partir do comprimento de rampa (L) e da declividade (S);

C = fator de cobertura do solo;

P = o fator de práticas conservacionistas.

Fator erosividade da chuva (fator R)

O fator R foi calculado a partir de índices mensais de erosão, obtidos pela Equação 2, desenvolvida por Lombardi Neto e Moldenhauer (1992):

$$EI_i = 67,355 (r_i^2 / P_i)^{0,85} \quad (2)$$

Em que:

EI_i = média mensal do índice de erosão, no i-ésimo mês ($MJ\ ha^{-1}mm^{-1}h^{-1}ano^{-1}$);

r_i = precipitação pluvial média mensal, em mm, no i-ésimo mês;

P_i = precipitação pluvial média anual, em mm; ($1 \leq i \leq 12$).

Todos os dados da Estação Santa Maria (RS) foram extraídos do *site* do Instituto Nacional de Meteorologia (Inmet) (Tabela 1).

Fator erodibilidade do solo (fator K)

Para calcular o fator K, foi realizada uma amostragem de solo em uma malha irregular de 340 pontos na bacia hidrográfica (Figura 3), em que foram coletadas três subamostras em cada local de coleta para formar uma amostra composta na profundidade de 0–20 cm. Foram realizadas análises físicas segundo metodologia preconizada por Teixeira *et al.* (2017). O fracionamento da área foi realizado em cinco classes: areia muito grossa (2,0–1,0 mm); areia grossa (1,0–0,5 mm); areia média (0,5–0,25 mm); areia fina (0,25–0,10 mm); e areia muito fina (0,10–0,05 mm).

O fator K foi calculado para cada ponto da malha de amostragem empregando-se o modelo selecionado por Denardin (1990) para solos do Brasil e dos Estados Unidos, conforme a Equação 3:

$$K = 0,00000748*Y1 + 0,00448059*Y2 - 0,0631175*Y3 + 0,01039567*Y4 \quad (3)$$

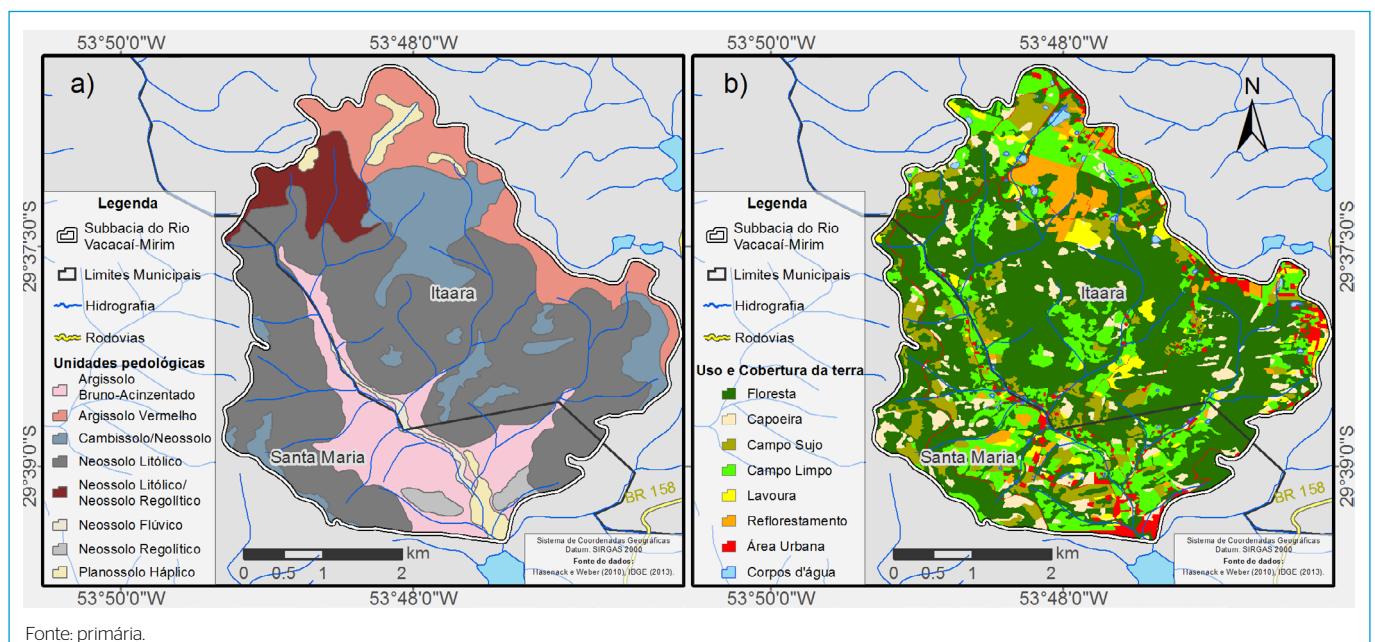


Figura 2 - (A) Mapa de solos e (B) de uso atual da terra da Bacia Hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim/Rio Grande do Sul, no ano de 2017.

Em que:

K = erodibilidade estimada em $Mg\ h\ MJ^{-1}\ mm^{-1}$;

Y1 = (%silte + %areia muito fina) * (100 - %argila);

Y2 = permeabilidade do solo, de acordo com a classificação: rápida = 1; moderada a rápida = 2; moderada = 3; lenta a moderada = 4; lenta = 5; muito lenta = 6;

Y3 = o diâmetro médio da partícula (DMP), expressa em mm e calculada segundo a equação, $Y3 = \sum(Ci * Pi)$, em que: Ci = centro da classe textural i, expresso em mm;

Pi = proporção de ocorrência da classe textural i, expressa em %; Y4 = (%MO / %areia total - %areia muito fina), em que: MO% = o valor da matéria orgânica em percentagem.

As variáveis Y1, Y3 e Y4 foram calculadas com base nos resultados analíticos da camada amostrada de 0 a 20 cm. A variável Y2 foi determinada com base na granulometria das amostras em que foram atribuídos códigos de permeabilidade para cada amostra.

A espacialização dos valores do fator K foi interpolada pelo método da krigagem ordinária, utilizando-se os parâmetros do semivariograma. Também foi realizado o teste de validação cruzada — um indicador da qualidade do ajuste global da análise geoestatística que consiste em retirar um ponto do conjunto original de dados e estimá-lo a partir dos restantes. Todas as análises geoestatísticas foram realizadas utilizando-se o programa GS+. Os dados interpolados por meio da krigagem foram exportados (formato grd) para o programa ArcGIS 10.2.2 com o objetivo de gerar o mapa do fator K.

Fator topográfico (fator LS)

O fator LS representa o fator topográfico, em que o fator L refere-se ao comprimento da encosta e o fator S ao grau de declividade. Esse fator é definido como a taxa de perda de solo por unidade de área de uma parcela-padrão de 22,13 m de comprimento e 9% de declive (WISCHMEIER; SMITH, 1978). O mapa do fator LS foi obtido segundo método proposto por Desmet e Govers (1996), o que, de acordo com Minella, Merten e Ruhoff (2010), é importante por incorporar, no fator LS, conceitos de potencial do escoamento, área de fluxo acumulado e técnicas de geoprocessamento. Assim, por meio de métodos de representação espacial, é possível calcular o fator LS para grandes áreas e de relevo complexo, como em bacias hidrográficas. Dessa maneira, o fator L (comprimento de encosta) foi obtido por intermédio da seguinte Equação 4:

$$L_{ij} = [(A_{ij} + D^2)_{ij}^{m+1} - A_{ij}^{m+1}] / [D^{m+2} (\sin\theta_{ij} + \cos\theta_{ij})^m (22,13)^m] \quad (4)$$

Em que:

i e j = as coordenadas da célula localizada no mapa da bacia;

A = a área de fluxo acumulado;

D = a resolução da grade de células;

α = o ângulo da direção do fluxo;

m = o expoente do comprimento das encostas;

θ = a declividade média da vertente.

A curvatura das vertentes é fator importante que condiciona o comportamento dos processos erosivos (MINELLA; MERTEN; RUHOFF, 2010). Assim, para o cálculo do fator declividade (S), foi utilizada a seguinte Equação 5:

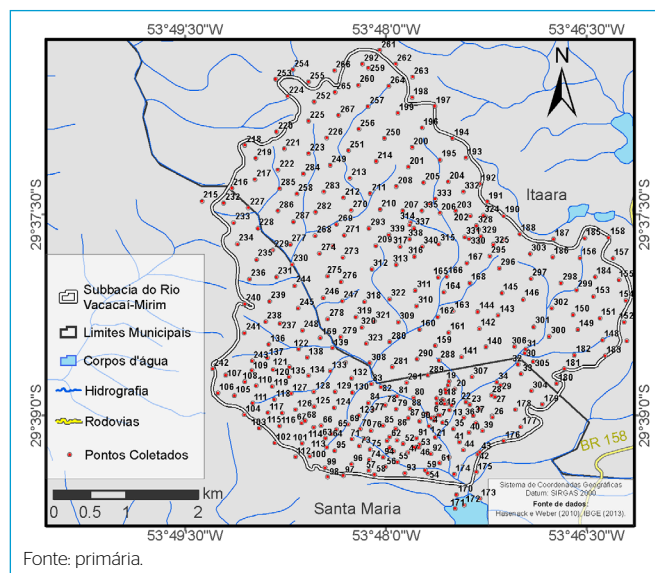
$$S_{ij} = 65,41 * \sin\theta_{ij} + 4,56 * \cos\theta_{ij} + 0,065 \quad (5)$$

A construção do mapa do fator LS partiu da obtenção de um modelo digital de elevação (MDE) por meio da digitalização da hipsometria e posterior extração dos demais atributos de terreno, como a direção de fluxo, a área de contribuição específica e o mapa de declividade, utilizando-se as opções de cálculo disponíveis *software* ArcGIS 10.2.2.

Fator uso e manejo do solo e práticas conservacionistas (fator CP)

O fator C expressa o efeito combinado da proteção oferecida pela cobertura vegetal (Figura 2B), ou seja, a relação entre as perdas de solo de uma área cultivada em determinadas condições e as perdas de solo de um terreno que é mantido descoberto (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2010), e o fator P refere-se às práticas de controle da erosão.

Para a estimativa do potencial natural de perda de solo, foi utilizada a combinação dos fatores K, LS e R (sem a inclusão do fator CP). Assim, as variáveis antrópicas podem ser tratadas separadamente, com o intuito de minimizar os efeitos negativos que ocorrem no meio físico. Para espacializar os fenômenos, os fatores C e P são integrados em função do uso e da ocupação do solo e assim é possível estimar o potencial total de perda do solo. Para o presente estudo,



Fonte: primária.

Figura 3 - Malha de amostragem de solos da área de estudo.

Tabela 1 - Normais climatológicas de precipitação (1961 a 1990) para Santa Maria, Rio Grande do Sul.

| Jan. | Fev. | Mar. | Abr. | Mai | Jun. | Jul. | Ago. | Set. | Out. | Nov. | Dez. |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 145,1* | 130,2 | 151,7 | 134,7 | 129,1 | 144,0 | 148,6 | 137,4 | 153,6 | 145,9 | 132,2 | 133,5 |

*Precipitação total referente a cada mês do ano em mm.
Fonte: primária.

foram utilizados como fator C os dados da Tabela 2. O fator P foi considerado igual a 1 para toda a área, estabelecendo que não há práticas de controle da erosão, de acordo com o procedimento também adotado por Ozcan *et al.* (2008).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Mapeamento dos fatores da equação universal de perda de solo

A erosividade das chuvas (fator R) para a Bacia do Rio Vacacaí-Mirim apresentou valor médio de $6.556 \text{ MJ ha}^{-1} \text{ mm}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, convergindo com Trindade *et al.* (2016), que observaram fator R de $6.529 \text{ MJ ha}^{-1} \text{ mm}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ na Bacia Hidrográfica do Atlântico Sul, na qual a Bacia Hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim está inserida, onde os índices de chuvas se mantêm praticamente constantes ao longo do ano, sem distinção clara entre as estações úmidas e secas, conforme Tabela 1.

O fator K apresentou comportamento de uma variável regionalizada, isto é, uma variável com dependência espacial, sendo isso verificado pela análise do semivariograma, em que os parâmetros obtidos foram efeito pepita ($C_0 = 0,0001$), alcance ($A_0 = 2,090 \text{ m}$) e patamar ($C_0 + C = 0,0004$). O fator K variou entre 0,013 e $0,063 \text{ t h MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ (Figura 4A), convergindo com estudo de Ten Caten, Minella e Madruga (2012) realizado na região central do estado do Rio Grande do Sul. Contudo, no presente estudo, foram observados os maiores valores de K na parte norte da bacia, nas áreas de maiores altitudes, enquanto os menores valores foram observados na parte sul da bacia (Figura 4A), em que ocorrem os menores valores de altitude da bacia hidrográfica.

A maior suscetibilidade à erosão foi observada na parte norte da bacia (Figura 4A), com os maiores valores do fator K observados em áreas nas quais predominam solos mais rasos, como os Neossolos Litólicos, e associações de Cambissolo-Neossolo e Neossolo Litólico-Neossolo Regolítico (Figura 2A). Isso está relacionado à textura franco arenosa de ambos os solos, uma vez que são derivados de rochas de arenito da Formação Botucatu e Formação Caturrita. Esse resultado vai ao encontro das observações de Barros *et al.* (2018), que também observaram alta suscetibilidade à erosão em bacias com predomínio de Neossolos. Bonilla e Johnson (2012) observaram menor erodibilidade em solos com maiores teores de areia e atribuíram isso ao fato de que à medida que o tamanho da partícula diminui

ou aumenta além do intervalo de 20 a $200 \mu\text{m}$, se torna mais difícil separar e transportar partículas por causa da massa de partículas, quando acima desse intervalo, ou por causa das forças coesivas contra o desprendimento de partículas, quando abaixo desse intervalo.

Na parte sul da bacia, a presença de Argissolos Bruno-Acinzentados (Figura 2A) resultou em menor suscetibilidade à erosão. No entanto, em monitoramento da erosão do solo nessa mesma bacia hidrográfica, Moura-Bueno *et al.* (2018) observaram as maiores perdas de solo para a classe dos Argissolos Bruno-Acinzentados e relacionaram tal fato com as características pedológicas e de uso da terra. Cabe ressaltar que trabalho de Moura-Bueno *et al.* (2018) realizou a quantificação da perda solo pontualmente em uma parcela de 1 m^2 .

Os resultados associados ao fator LS indicam que seus valores variaram de 0,03 a 70,3 (Figura 4B), sendo os menores observados nas áreas localizadas próximas à drenagem principal da bacia. O fator LS apresenta comportamento de maneira semelhante na região mais elevada da bacia (parte norte). Nesses locais, o relevo varia de plano a suave ondulado com declividade máxima de 5%. Os valores de 15 a 70,3 do fator LS são encontrados próximos aos topos dos morros e correspondem a áreas com declividade superior a 100% (Figura 4B), nas quais os comprimentos de vertentes são maiores, convergindo com os resultados obtidos por Barros *et al.* (2018) e Durães e Mello (2016).

O mapa de uso e manejo do solo (fator CP) mostrou que as áreas de floresta ocupam mais da metade da bacia hidrográfica, seguidas, em ordem decrescente, por campo limpo, capoeira, campo sujo, lavoura, silvicultura, área urbanizada e corpo d'água (Figura 5). Importante observar que as áreas de encostas nas quais se observam os maiores valores do fator LS (Figura 4B) estão com cobertura florestal (Figura 5), o que tende a diminuir a perda de solos nessas áreas que apresentam maior potencial para ocorrência do processo erosivo. Isso causa configuração mais favorável de conservação do solo e menor produção de sedimentos ao longo da bacia, principalmente nas áreas de encosta (DIDONÉ *et al.*, 2014; TEN CATEN; MINELLA; MADRUGA, 2012).

Na Figura 5 também se observa que as lavouras (CP de 0,29) na parte norte da bacia localizam-se em áreas onde a erodibilidade do solo é maior ($0,05$ a $0,06 \text{ t h MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$, Figura 4A) e o fator LS é menor ($0,03$ a 1 , Figura 4B). Já na parte sul essas áreas agrícolas localizam-se onde a erodibilidade do solo é menor ($0,0132$ a $0,03 \text{ t h MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$, Figura 4A) e o fator LS apresenta valores intermediários ($0,03$ a 10) (Figura 4B). Tal fato mostra a complexidade da interação entre esses dois fatores que influenciam o processo erosivo, evidenciando a importância de estudos sobre a estimativa das perdas de solo utilizando a EUPS em bacias hidrográficas de encosta.

Estimativa do potencial natural de perda de solo

Com a implementação da EUPS em ambiente SIG e ajustando-se os fatores do modelo às condições locais da área de estudo, foi possível estimar as taxas médias de perda de solo para as condições de uso e manejo encontradas na área. É importante chamar a atenção para o fato de que tal modelagem não contempla os processos de erosão em deposição nas encostas, assim, as taxas estimadas são indicativas de uma expectativa de erosão e da intensidade do processo (WEILL; SPAROVEK, 2008). No presente trabalho, observou-se que em 29% da área da bacia ($548,01 \text{ ha}$), o potencial de perda natural do

Tabela 2 - Valores relativos ao fator C para as classes de uso da terra.

| Classes de uso da terra | Fator C | Fonte* |
|-------------------------|---------|-----------------------------|
| Floresta | 0,012 | Ruhoff <i>et al.</i> (2006) |
| Capoeira | 0,260 | Ruhoff <i>et al.</i> (2006) |
| Campo Sujo | 0,260 | Ruhoff <i>et al.</i> (2006) |
| Campo Limpo | 0,260 | Ruhoff <i>et al.</i> (2006) |
| Lavoura | 0,290 | Ruhoff <i>et al.</i> (2006) |
| Reflorestamento | 0,200 | Devicari (2009) |
| Urbano | 0,100 | Devicari (2009) |

*Valores do fator uso e manejo do solo extraído de trabalhos onde foram consideradas condições semelhantes.
Fonte: primária.

solo está entre 1.000 e 2.000 Mg ha⁻¹ ano⁻¹, enquanto em 21% da área (397,30 ha) esse valor ultrapassa 2.000 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ (Figura 6). Perdas de solo entre 500–1.000, 250–500 e 4–250 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ correspondem, respectivamente, a 18,88 (357,06 ha), 14,77 (279,38 ha) e 16,38% (309,95 ha).

As maiores taxas de perdas de solo, ou seja, acima de 1.000 Mg ha⁻¹ ano⁻¹, comumente observadas em solos de clima tropical (FAO, 2015), abrangeram praticamente 50% da área (Figura 6) e se concentraram principalmente nas maiores declividades (Figura 4B). Esses resultados vão ao encontro das afirmações de Weill e Sparovek (2008) de que, para um mesmo uso do solo com o fator CP constante, o fator LS é o que mais influencia a variação observada nas taxas estimadas de erosão. Adicionalmente, o parâmetro LS (Figura 4B) também se mostra como o fator predominante em relação ao fator K, pois, conforme mostram as Figuras 2A e 4A, os Neossolos Litólicos têm praticamente o mesmo valor do fator K que os Argissolos Vermelhos. Contudo, este último faz parte da classe com menores perdas de solo, evidenciando a influência potencial do fator LS na magnitude do processo erosivo na área em estudo.

Estimativa do potencial total de perda de solo

A integração de todos os fatores da EUPS resultou no mapa de potencial total de perda de solo (Figura 7). Observa-se que na maior parte da bacia, cerca de 43%, a estimativa de perda de solo anual é 0 a 25 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ (Tabela 3). Essa situação é devida ao baixo valor do fator CP (0,012) para grande parte da área (Figura 5). Esse baixo valor representa boa proteção do solo contra o impacto direto das gotas de chuva. A maior área da bacia tem pouca agricultura, baixa densidade populacional e áreas de vegetação nativa considerável.

Em torno de 30% da área apresenta estimativa de perda de solo entre 25 e 100 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ (Tabela 3), sendo isso relacionado aos valores intermediários do fator CP nessas áreas (Figura 5). O restante da área, 27%, apresenta a maior perda de solo estimada, com valores variando entre 100 e > 500 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ (Tabela 3), sendo tal resultado consequência da menor

cobertura do solo e da ausência de práticas de manejo (fator CP) (Figura 5), corroborando o estudo de Didoné et al. (2014), que mostra que a carência de práticas conservacionistas em áreas de lavoura no RS é a principal causa do processo erosivo acelerado.

Estudo relacionado a solos pouco desenvolvidos sugere limites para perdas de solos, nos quais valores que variam de 2 a 5 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ para solos rasos ou muito suscetíveis aos processos erosivos e de 11 a 25 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ para áreas montanhosas e com totais pluviométricos elevados (RUHOFF et al., 2006) podem ser considerados médios. De maneira geral, os valores encontrados pelo presente estudo demonstram perda de solo com índices elevados e que necessitam de adequação de manejo. Observou-se que o fator CP tem grande influência no controle das taxas de perda de solo, pois as áreas com percentual natural de perda de solo superior a 1.000 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ observadas na Figura 6

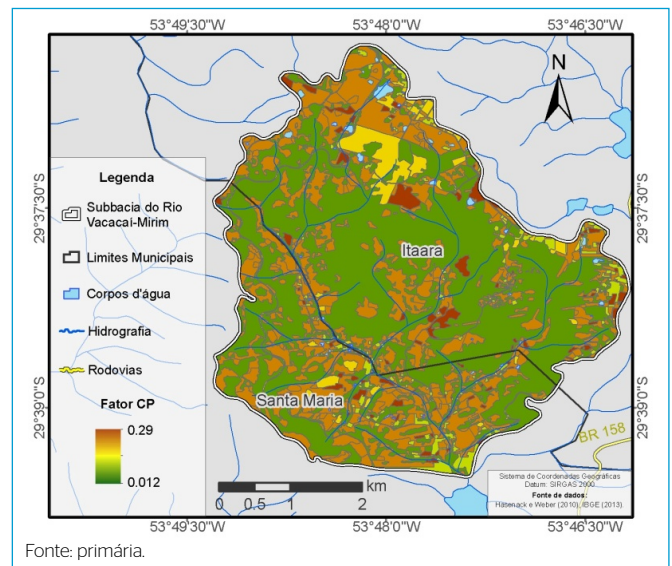


Figura 5 - Mapa do fator uso e manejo do solo (fator CP) para a área de estudo.

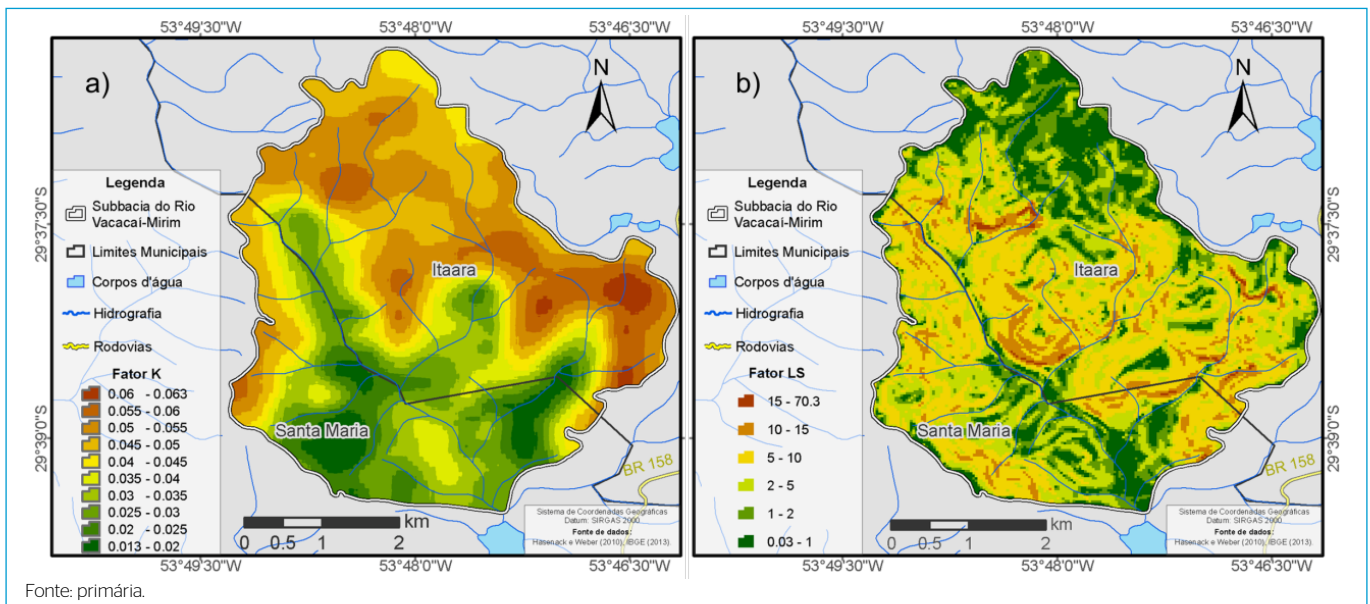


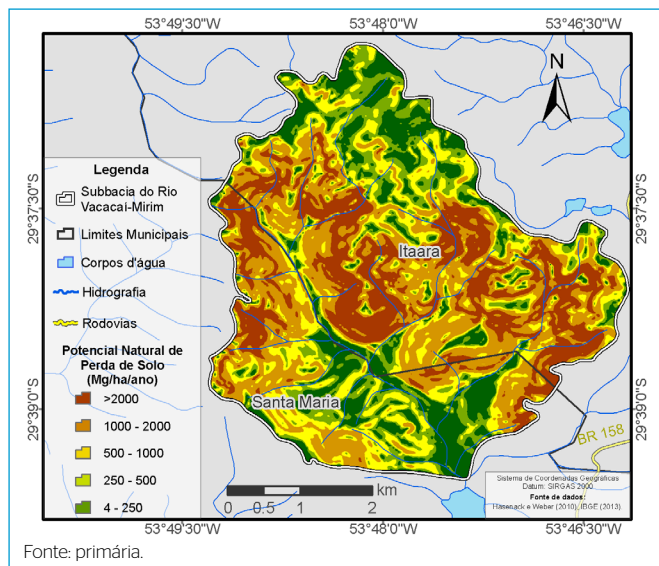
Figura 4 - Mapas do (A) fator erodibilidade do solo e (B) fator topográfico da área de estudo.

apresentaram redução na estimativa de perda de solo, com valores de $250 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ (Figura 7) quando o fator CP é considerado. Isso indica que independentemente da combinação de outros fatores, sejam eles naturais ou antrópicos, o fator CP se sobressai. Zhou *et al.* (2008) afirmam que, entre os fatores que afetam a erosão do solo, o CP e o LS são os mais importantes, visto que a remoção do material vegetal pode ocasionar enxurradas, principalmente em áreas montanhosas. A importância da cobertura do solo na redução das perdas médias de água e solo foi relatada por Dechen *et al.* (2015), que identificaram que um solo com 90% de cobertura reduz em mais de 50% a taxas de erosão. Moura-Bueno *et al.* (2018), ao quantificarem perda de solo e água em parcelas de áreas de encosta, observaram que as perdas foram significativamente menores em áreas com uso da terra campo nativo e floresta nativa, quando comparadas a lavouras com solo descoberto. Da mesma forma, Wang *et al.* (2016) identificaram que as maiores taxas de erosão estão relacionadas a ecossistemas frágeis que sofreram mudanças no uso da terra. Portanto, os resultados encontrados no presente estudo mostram a importância de pesquisas em áreas de encosta e indicam a necessidade de mais pesquisas nessas áreas, para melhor compreensão do processo erosivo, permitindo, assim, o planejamento de uso do recurso natural solo, visando à mitigação da degradação do solo e da contaminação dos recursos hídricos.

CONCLUSÕES

As taxas de perdas de solo maiores que $100 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ abrangem em torno de 27% da área e se concentram em locais de maiores declividades em que predominam solos rasos (Neossolos Litólicos e Neossolos Regolíticos) associados com menor cobertura do solo. Perdas de solo menores que $25 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ocorrem em 43% da bacia, em que o fator cobertura do solo é maior.

O fator LS (comprimento da encosta e grau de declividade) determinou a magnitude do processo erosivo acelerado e o fator C (cobertura do solo) apresentou a maior relação com o controle das perdas de solo na bacia hidrográfica.

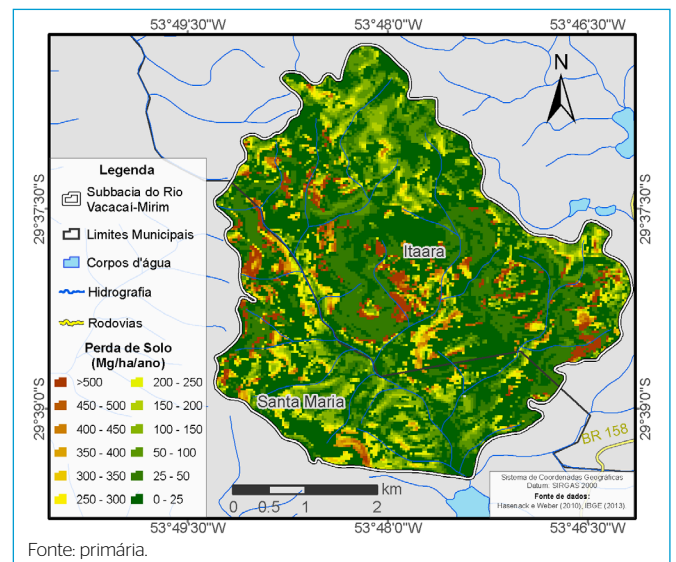


Fonte: primária.

Figura 6 - Potencial natural de perda de solo ($\text{Mg ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$) da Bacia Hidrográfica do Rio Vacacai-Mirim, Santa Maria/Rio Grande do Sul.

Os resultados encontrados mostram a importância que as autoridades de gestão ambiental devem dar para o fator cobertura do solo, em que medidas de manutenção da vegetação e práticas conservacionistas devem ser adotadas e consideradas pelos gestores ambientais em regiões de encosta com predomínio de solos rasos associados a relevo declivoso. Esses resultados podem ser extrapolados para áreas que apresentam as mesmas condições ambientais do presente estudo.

Dessa forma, considerando-se que na região Sul do Brasil sistemas de produção agrícola familiar predominam em áreas de encosta de maior fragilidade e riscos de erosão do solo, este estudo mostra que o processo erosivo acelerado pode causar expressivo impacto econômico, social e ambiental, caso as perdas de solos alcancem taxas maiores que $100 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$.



Fonte: primária.

Figura 7 - Potencial total de perdas de solo ($\text{Mg ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$) da Bacia Hidrográfica do Rio Vacacai-Mirim, Santa Maria/Rio Grande do Sul.

Tabela 3 - Potencial Total de Perda de Solo da Bacia Hidrográfica do Vacacai-Mirim, Rio Grande do Sul.

| Classes ($\text{Mg ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$) | Hectares | % |
|--|----------|-------|
| 0-25 | 820,67 | 43,38 |
| 25-50 | 384,98 | 20,35 |
| 50-100 | 181,13 | 9,58 |
| 100-150 | 112,47 | 5,95 |
| 150-200 | 79,69 | 4,21 |
| 200-250 | 63,07 | 3,33 |
| 250-300 | 51,35 | 2,71 |
| 300-350 | 39,70 | 2,10 |
| 350-400 | 35,94 | 1,90 |
| 400-450 | 28,00 | 1,48 |
| 450-500 | 24,60 | 1,30 |
| > 500 | 70,05 | 3,70 |

Fonte: primária.

Por fim, pesquisas desenvolvidas em áreas de encosta necessitam de mais informações sobre o impacto da erosão do solo, visando a fomentar o desenvolvimento de políticas públicas para o uso agrícola sustentável do solo.

CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

Miguel, P.: Conceituação, Curadoria de Dados, Análise Formal, Investigação, Administração do Projeto, Supervisão, Escrita Revisão e Edição. Dalmolin, R.S.D.: Conceituação, Curadoria de Dados, Análise Formal, Investigação,

Administração do Projeto, Supervisão, Escrita Revisão e Edição. Moura-Bueno, J.M.: Conceituação, Curadoria de Dados, Análise Formal, Investigação, Administração do Projeto, Supervisão, Escrita Revisão e Edição. Soares, M.F.: Metodologia, Validação, Escrita – Primeira Redação. Cunha, H.N. Metodologia, Validação, Escrita – Primeira Redação. Albert, R.P.: Investigação, Metodologia, Validação, Escrita – Primeira Redação. Stumpf, L.: Investigação, Metodologia, Validação, Escrita – Primeira Redação. Leidemer, J.D. Investigação, Metodologia, Validação, Escrita – Primeira Redação.

REFERÊNCIAS

- ANACHE, J.A.A.; WENDLAND, E.C.; OLIVEIRA, P.T.S.; FLANAGAN, D.C.; NEARING, M.A. Runoff and soil erosion plot-scale studies under natural rainfall: A meta-analysis of the Brazilian experience. *Catena*, v. 152, p. 29-39, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.01.003>
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. *Conservação do solo*. São Paulo: Ícone, 2010. 360 p.
- BESKOW, S.; MELLO, C.R.; NORTON, L.D.; CURTI, N.; VIOLA, M.R.; AVANZI, J.C. Soil erosion prediction in the Grande River Basin, Brazil using distributed modeling. *Catena*, v. 79, n. 1, p. 49-59, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2009.05.010>
- BARROS, E.N.S.; VIOLA, M.R.; RODRIGUES, J.A.M.; DE MELLO, C.R.; AVANZI, J.C.; ALVES, M.V.G. Modelagem da erosão hídrica nas bacias hidrográficas dos rios Lontra e Manoel Alves Pequeno, Tocantins. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, v. 13, n. 1, p. 1-9, 2018. <https://doi.org/10.5039/agraria.v13i1a5509>
- BONILLA, C.A.; JOHNSON, O.I. Soil erodibility mapping and its correlation with soil properties in Central Chile. *Geoderma*, v. 189-190, p. 116-123, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.05.005>
- DECHEN, S.C.F.; TELLES, T.S.; GUIMARÃES, M.D.F.; MARIA, I.C.D. Losses and costs associated with water erosion according to soil cover rate. *Bragantia*, v. 74, n. 2, p. 224-233, 2015. <https://doi.org/10.1590/1678-4499.0363>
- DENARDIN, J.E. *Erodibilidade do solo estimada por meio de parâmetros físicos e químicos*. 114f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 1990.
- DESMET, P.J.J.; GOVERS, G. A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units. *Journal of Soil and Water Conservation*, v. 51, n. 5, p. 427-433, 1996.
- DEVICARI, L.F. *O Modelado de Dissecação do Relevo como Fator Topográfico na Equação Universal de Perda de Solo Aplicado ao Município de São Pedro do Sul – RS*. 124f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.
- DIDONÉ, E.J.; MINELLA, J.P.G.; REICHERT, J.M.; MERTEN, G.J.H.; DALBIANCO, L.; BARRROS, C.A.P.; RAMON, R. Impact of no-tillage agricultural systems on sediment yield in two large catchments in Southern Brazil. *Journal of Soils and Sediments*, v. 14, p. 1287-1297, 2014. <https://doi.org/10.1007/s11368-013-0844-6>
- DURÃES, M.F.; MELLO, C.R. Distribuição espacial da erosão potencial e atual do solo na Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaí, MG. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 21, n. 4, p. 677-685, 2016. <https://doi.org/10.1590/s1413-41522016121182>
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). *Status of the World's Soil Resources*. FAO, 2015. 648 p.
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). *Portal*. Brasil: INMET. Disponível em: <<https://portal.inmet.gov.br/>>. Acesso em: 15 mar. 2018.
- LOMBARDI NETO, F.; MOLDENHAUER, W.C. Erosividade da chuva: sua distribuição e relação com as perdas de solo em Campinas (SP). *Bragantia*, v. 51, n. 2, p. 189-196, 1992. <https://doi.org/10.1590/S0006-87051992000200009>
- MIGUEL, P.; DALMOLIN, R.S.D.; PEDRON, F.A.; MOURA BUENO, J.M.; TIECHER, T. Identificação de fontes de produção de sedimentos em uma bacia hidrográfica de encosta. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 38, n. 2, p. 585-598, 2014. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000200023>
- MIGUEL, P.; DALMOLIN, R.S.D.; PEDRON, F.A.; SAMUEL-ROSA, A.; MEDEIROS, P.S.C.; MOURA-BUENO, J.M.; BALBINOT, A. Solo e dinâmica de ocupação das terras em áreas do Rebordo do Planalto do Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Agrociência*, v. 17, n. 4, p. 447-445, 2011. Disponível em: <<https://periodicos.ufpel.edu.br/ojs2/index.php/CAST/article/view/2080>>. Acesso em: ago. 2018. <https://doi.org/10.18539/cast.v17i4.2080>
- 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*, v. 34, n. 4, p. 1455-1462, 2010. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000400041>
- MOURA-BUENO, J.M.; DALMOLIN, R.S.D.; MIGUEL, P.; HORST, T.Z. Erosão em áreas de encosta com solos frágeis e sua relação com a cobertura do solo. *Scientia Agraria*, v. 19, n. 1, p. 102-112, 2018. <https://doi.org/10.5380/rsav19i1.53738>
- OZCAN, A.U.; ERPUL, G.; BASARAN, M.; ERDOGAN, H.E. Use of USLE/GIS technology integrated with geostatistics to assess soil erosion risk in different land uses of Indagi Mountain Pass-Çankiri, Turkey. *Environmental Geology*, v. 53, n. 8, p. 1731-1741, 2008. <https://doi.org/10.1007/s00254-007-0779-6>

PANAGOS, P.; BORRELLI, P.; MEUSBURGER, K.; YU, B.; KLIK, A.; LIM, K.J.; YANG, J.; NI, J.; MIAO, C.; CHATTOPADHYAY, N.; SADEGHI, S.H.; HAZBAVI, Z.; ZABIHI, M.; LARIONOV, G.A.; KRASNOV, S.F.; GOROBETS, A.V.; LEVI, Y.; ERPUL, G.; BIRKEL, C.; HOYOS, N.; NAIPAL, V.; OLIVEIRA, P.T.; BONILLA, C.; MEDDI, M.; NEL, W.; AL DASHTI, H.; BONI, M.; DIODATO, N.; VAN OOST, K.; NEARING, M. BALLABIO, C.. Global rainfall erosivity assessment based on high-temporal resolution rainfall records. *Scientific Reports*, v. 7, n. 1, p. 4175, 2017. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-04282-8>

RUHOFF, A.L.; SOUZA, B.S.P.; GIOTTO, E.; PEREIRA, R.S. Avaliação dos processos erosivos através da equação universal de perdas de solos, implementada com algoritmos em legal. *Geomática*, v. 1, n. 1, p. 12-22, 2006. Disponível em: <<http://repositorio.furg.br/handle/1/935>>. Acesso em: jul. 2018.

TEIXEIRA, P.C.; DONAGEMA, G.K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W.G. *Manual de métodos de análise de solos*. 3. ed. Brasília: Embrapa, 2017. 573 p.

TEN CATEN, A.; MINELLA, J.P.; MADRUGA, P.R.D.A. Desintensificação do uso da terra e sua relação com a erosão do solo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 16, n. 9, p. 1006-1014, 2012. Disponível em: <<http://www.agriambi.com.br/revista/v16n09/v16n09a12.pdf>>. Acesso em: jun. 2018. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662012000900012>

TIECHER, T.; MINELLA, J.P.G.; CANER, L.; EVRARD, O.; ZAFAR, M.; CAPOANE, V.; DOS SANTOS, D.R. Quantifying land use contributions to suspended sediment in a large cultivated catchment of Southern Brazil (Guaporé River,

Rio Grande do Sul). *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v. 237, p. 95-108, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.12.004>

TRINDADE, A.L.F.; DE OLIVEIRA, P.T.S.; ANACHE, J.A.A.; WENDLAND, E. Variabilidade espacial da erosividade das chuvas no Brasil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 51, n. 12, p. 1918-1928, 2016. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016001200002>

WANG, X.; ZHAO, X.; ZHANG, Z.; YI, L.; ZUO, L.; WEN, Q.; LIU, B.; XU, J.; HU, S.; LIU, B. Assessment of soil erosion change and its relationships with land use/cover change in China from the end of the 1980s to 2010. *Catena*, v. 137, p. 256-268, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.10.004>

WEILL, M.D.A.; SPAROVEK, G. Estudo da erosão na microbacia do Ceveiro (Piracicaba, SP). Estimativa das taxas de perda de solo e estudo de sensibilidade dos fatores do modelo EUPS. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 32, n. 2, p. 801-814, 2008. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000200034/>>. Acesso em: jul. 2018.

WISCHMEIER, W.H.; SMITH, D.D. *Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning*. Washington: United States Department of Agriculture, 1978. 58 p.

ZHOU, P.; LUUKKANEN, O.; TOKOLA, T.; NIEMINEN, J. Effect of vegetation cover on soil erosion in a mountainous watershed. *Catena*, v. 75, n. 3, p. 319-325, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2008.07.010>

