

ESTIMATIVA DA PERDA ANUAL DE SOLOS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO CÓRREGO MARINHEIRO, SETE LAGOAS – MG, POR MEIO DA RUSLE

Estimation of the annual soil loss in the Marinheiro Creek watershed (Sete Lagoas – MG Brazil) using the RUSLE

Hugo Henrique Cardoso de Salis*

Adriana Monteiro da Costa**

João Herbert Moreira Viana***

***Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG / Belo Horizonte, Minas Gerais**

hugohcsalis@gmail.com

****Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG / Belo Horizonte, Minas Gerais**

drimonteiroc@gmail.com

*****Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA Milho e Sorgo / Sete Lagoas, Minas Gerais**

joao.herbert@embrapa.br

RESUMO

A erosão do solo tem sido reconhecida há muito tempo como um problema ambiental muito sério, especialmente em regiões onde ocorre interferência antrópica e gestão agrícola sem critérios adequados. Neste trabalho utiliza-se o modelo empírico RUSLE para estimar a perda anual de solos da bacia do córrego Marinheiro, Sete Lagoas – MG. Os resultados mostraram que a perda anual de solos na bacia apresentou valor médio estimado em 7,15 ton. ha⁻¹.ano⁻¹. Além disso, foi possível classificar e caracterizar os resultados obtidos para a área de estudo em seis categorias distintas, quais sejam: 0 a 1 (muito baixa); 1 a 3 (baixa); 3 a 5 (moderada); 5 a 10 (severa); 10 a 20 (alta); e acima de 20 ton. ha⁻¹. ano⁻¹(muito alta). Concluiu-se que, espacialmente, a área apresenta predominância das classes baixa e muito baixa de perda anual de solo (61,7% da bacia). No entanto, 21% da área apresentam riscos ambientais, com tendência do tipo severa a muito alta, devido aos processos erosivos mais intensos. Destaca-se que, segundo o modelo, nas áreas onde houve a implantação de atividades antrópicas, as perdas anuais de solos foram mais acentuadas. Os métodos descritos neste estudo permitiram uma compreensão mais clara da relação entre a erosão e seus principais fatores causais, podendo ser úteis para o planejamento e para a implantação de práticas e de manejos que favoreçam a conservação do solo e da água.

Palavras-chave: Erosão. Sistemas de Informações Geográficas. Planejamento Ambiental.

ABSTRACT

The soil erosion has been known for a long time as a serious environmental problem, especially in the areas with anthropic action and agricultural management without adequate criteria. This work applies the RUSLE empirical model to the estimation of the annual soil loss in the Marinheiro Creek watershed, Sete Lagoas - MG (Brazil). The results of the annual soil loss in the Marinheiro Creek watershed are 7.15 ton. ha⁻¹.year⁻¹ in average. It was also possible to classify and to characterize the results in six classes, 0 to 1 (very low); 1 to 3 (low); 3 to 5 (moderate); 5 to 10 (severe); 10 to 20 (high); and above 20 ton. ha⁻¹. year⁻¹ (very high). The dominant classes are the low and very low classes (61.7%). Nevertheless, 21% of the area present environmental risks associated to the severe to very high classes, which are subjected to enhanced erosion processes. It was noted that, accordingly to the model, the annual soil losses were higher in the areas under use. The methods presented here allowed the understanding of the relation of the erosion and its causes, being useful for the planning and the implementation of the management practices for soil and water conservation.

Keywords: Erosion. Geographic information systems. Environmental planning.

1 INTRODUÇÃO

A erosão do solo tem sido reconhecida há muito tempo como um problema ambiental muito sério, especialmente em regiões onde ocorre interferência antrópica e gestão agrícola sem critérios adequados (JORGE, 1986; AVANZI, 2005; MATOS, 2015). A erosão é um processo de desprendimentos de partículas de solo pela ação combinada da gravidade com a água, vento, gelo ou organismos e pode acarretar efeitos irreversíveis sobre o meio ambiente (LORANDI et al., 2001; MEDEIROS et al., 2016).

As partículas de solo transportadas podem conter nutrientes, pesticidas e diversos elementos químicos e não só causam danos ao solo e à produção agrícola, mas também afetam a qualidade da água em rios, em lagos, em represas, em córregos e nos recursos hídricos subterrâneos (BERTONI e LOMBARDI NETO, 2012). Em um sistema ambiental, produtivo e/ou econômico sustentável, a compreensão dos fatores que causam a erosão deve ser uma prioridade.

O planejamento da conservação do solo exige uma frequente estimativa da perda de solos, principalmente em escala regional, para que se possa compreender as complexas relações entre os fatores ambientais de forma mais detalhada. Nesse sentido, os modelos preditivos podem ser ferramentas importantes para gerar as estimativas quantitativas necessárias e ajudar a concepção de medidas de conservação sólidas (BATISTA, 2016).

Dentre os modelos preditivos existentes, pode-se citar o EUROSEM (European Soil Erosion Model), WEPP (Water Erosion Prediction Project), SHE (Système Hydrologique Européen), SEMMED (Soil Erosion Model for Mediterranean Areas), entre outros (MERRITT et al., 2003). No entanto, um dos modelos mais utilizados é o modelo empírico chamado *Revised Universal Soil Loss Equation*, também conhecido como equação universal (revisada) de perdas de solo (RUSLE/USLE). Recentemente, a RUSLE tem sido aplicada em larga escala e em diversas regiões, bem como em bacias hidrográficas de diferentes dimensões (NERY e LIMA, 2013; FARHAN e NAWAISEH, 2015; KARAMESOUTI et al., 2016; COSTA et al., 2016).

Na bacia hidrográfica do córrego Marinheiro, localizada na região central do Estado de Minas Gerais, no município de Sete Lagoas, a erosão é uma ameaça que pode colocar em risco a qualidade ambiental e afetar a produção de alimentos e as atividades agropecuárias locais, devido ao potencial para promover a perda de fertilidade do solo, o assoreamento dos cursos d'água e a eutrofização dos recursos hídricos, por exemplo.

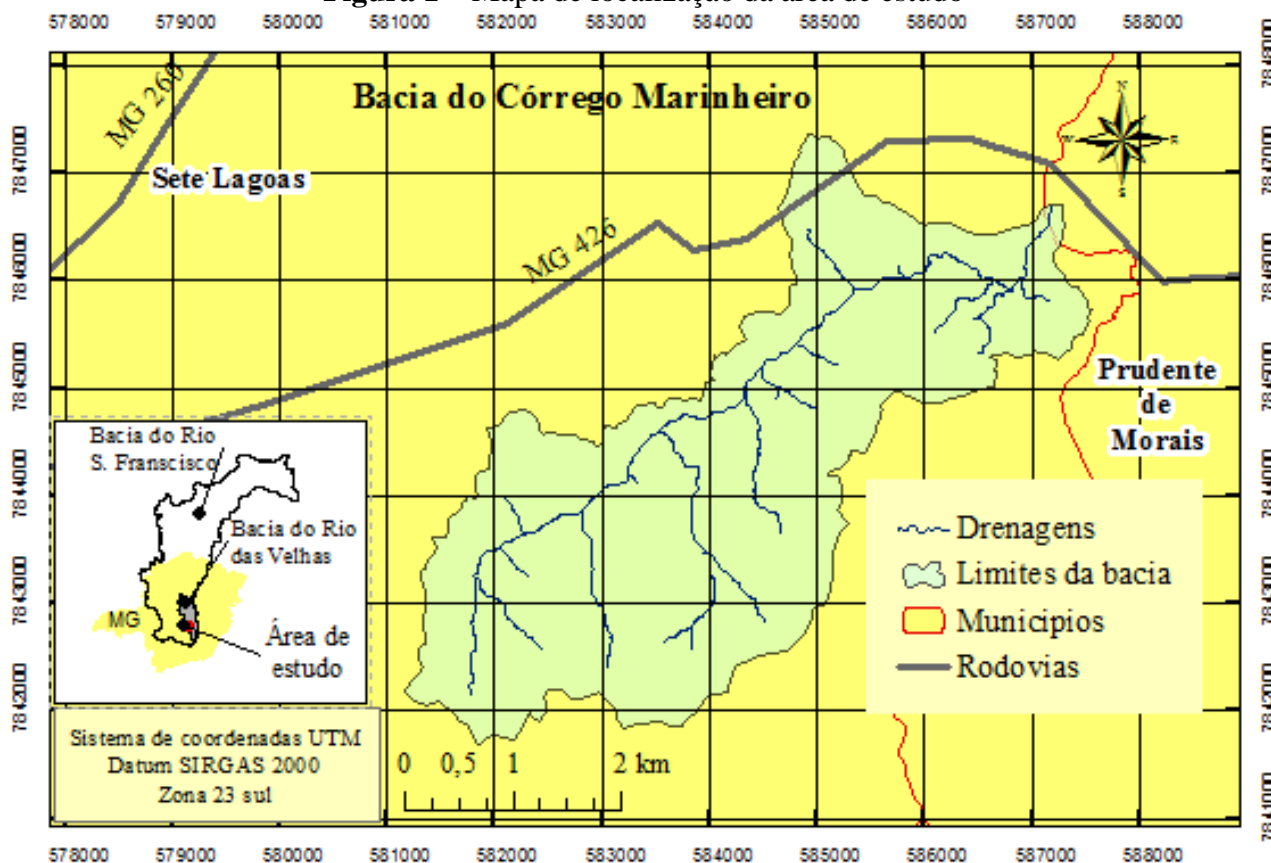
Nesse sentido, o objetivo deste estudo foi estimar a perda média anual de solos por meio do modelo empírico RUSLE na bacia do córrego Marinheiro, Sete Lagoas-MG.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A área de estudo abrange a bacia do Córrego Marinheiro (Figura 1), localizada no município de Sete Lagoas-MG, entre as coordenadas planas: Leste de 581100,3 a 587493,5 e Norte de 7841747,5 a 7847420,3 (Datum geodésico SIRGAS 2000 e projeção UTM 23 Sul), com área de aproximadamente 14,8 km². Fisiograficamente, a bacia se insere no bioma Cerrado, com fragmentos de vegetação nativa predominantemente do tipo floresta semidecidual montana e áreas antropizadas, com plantios de culturas anuais e pastagens para criação de gado (SCOLFORO et al., 2008).

Nos últimos 20 anos, a precipitação média mensal na região da bacia foi de 108 mm, enquanto a precipitação média anual chegou a, aproximadamente, 1.270 mm. Além disso, é importante ressaltar que o período chuvoso na área compreende os meses de outubro a março, com cerca de 150 mm em média cada um, enquanto os meses secos vão de abril a setembro, com precipitação variando entre 0 e 18 mm em média, em cada mês.

No período avaliado (1996 a 2016), o ano com maior volume de chuvas foi o de 1997, com registro pluviométrico de 1645 mm, seguido do ano de 2009, com 1635 mm. Já os anos mais secos foram 2014 e 2012, registrando cerca de 550 mm e 1066 mm, respectivamente (INMET, 2017).

Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo

Fonte: Elaborado pelos autores (2018).

Foi utilizado mapa de solos em escala 1:25.000 (OLIVEIRA, 2016); modelo digital de elevação (DEM) com resolução espacial de 12 metros do satélite TanDEM-X (WESSEL, 2013), cenas do satélite GEOEYE (resolução espacial de 0,5 metros), referente ao mês de maio de 2015 e software ArcGis versão 10.3 (ESRI, 2013), além do software NetErosividade MG, (MOREIRA et al., 2008).

Utilizou-se o modelo empírico RUSLE para estimar a perda anual de solos, determinada segundo a equação (1), proposta por Renard et al. (1997):

$$A = R.K.LS.C.P \quad (1)$$

Onde A (ton. ha⁻¹. ano⁻¹) é a perda média de solo em um determinado ponto geográfico; R (MJ. mm. ha⁻¹. h⁻¹. ano⁻¹) é o fator de erosividade da chuva; K (ton. ha. h. ha⁻¹. MJ⁻¹. mm⁻¹) é o fator de erodibilidade do solo; LS (adimensional) é o fator de declividade e comprimento de encosta; C é o fator de práticas de uso da terra e P (adimensional) é o fator de práticas contra a erosão.

O fator (R) de erosividade da chuva foi calculado por meio do software NetErosividade MG, que tem por objetivo possibilitar a obtenção dos valores mensais e anual da erosividade da chuva para qualquer localidade do Estado de Minas Gerais. Neste estudo, foi utilizada como base a equação (2), proposta por Wischmeier Smith (1978):

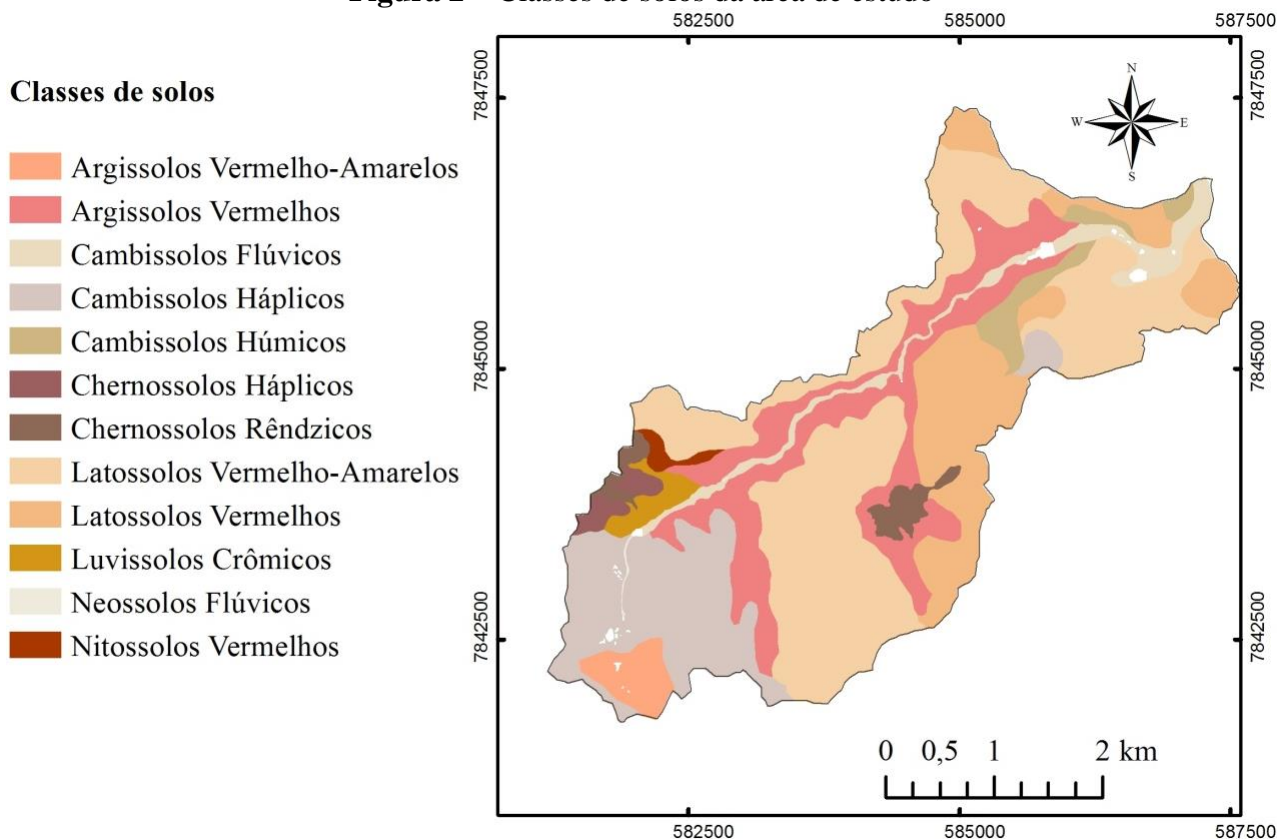
$$R = \sum_{i=1}^{12} 1.735 \times 10^{(1.5 \log_{10} \left(\frac{P_2^i}{P} \right) - 0.08188)} \quad (2)$$

Onde R é o fator de erosividade da chuva em MJ. mm.ha⁻¹. h⁻¹. ano⁻¹; P₂ é a precipitação mensal em mm e P é a precipitação anual em mm. Por meio do software NetErosividade MG, obteve-

se os valores de R para 15 pontos na bacia, escolhidos aleatoriamente. Em seguida, realizou-se a interpolação ponderada por distância inversa (IDW), no software Arcgis 10.3, para obter a distribuição espacial do fator de erosividade na bacia do córrego Marinheiro.

O fator (K) de erodibilidade do solo, em $\text{Mg ha h ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$, foi calculado com base em informações obtidas das análises físicas e químicas do levantamento semi-detalhado de solos na bacia do córrego Marinheiro (OLIVEIRA, 2016) – (Figura 2).

Figura 2 – Classes de solos da área de estudo



Fonte: Elaborado pelos autores (2018).

Para realização do cálculo da erodibilidade, utilizou-se a equação (3), desenvolvida por Denardim (1990) para solos do Brasil e dos Estados Unidos:

$$K = 7,48 \times 10^{-6} M + 4,48059 \times 10^{-3} P - 6,311175 \times 10^{-2} DMP + 1,039567 \times 10^{-2} R \quad (3)$$

Onde M, em porcentagem, é igual à soma entre areia fina mais silte, multiplicado pela soma entre areia fina mais silte, mais areia grossa; P é o valor da permeabilidade em todo o perfil do solo, estimado conforme Tabela 1, proposto originalmente por Wischmeier et al. (1971), que por sua vez foi adaptado com base nas características de permeabilidade dos solos da bacia, estudadas em campo por Amaral (2018).

Tabela 1 – Permeabilidade das classes texturais das classes de solo

Classe textural	Classe de permeabilidade	Permeabilidade
Argilosa-arenosa	5	Lenta
Argilosa, Franco-argilosa, Franco-argilo-siltosa	4	Lenta a moderada
Franco-argilo-arenosa	3	Moderada
Muito argilosa	2	Moderada a rápida

Fonte: Adaptado de Wischmeier et al. (1971) e Amaral (2018).

DMP é o diâmetro médio ponderado das partículas de solo (mm), obtido pela seguinte equação (4), desenvolvida por Arraes et al. (2010).

$$DMP = \frac{[(0,65 \times \text{areia grossa}) + (0,15 \times \text{areia fina}) + (0,0117 \times \text{silte}) + (0,00024 \times \text{argila})]}{100} \quad (4)$$

E R é o resultado da multiplicação entre o teor de areia grossa e o teor de matéria orgânica, dividido por 100, conforme equação (5) apresentada por Denardim (1990).

$$R = \text{areia grossa} \times \left(\frac{\text{Teor de Matéria Orgânica}}{100} \right) \quad (5)$$

O fator LS (adimensional) combina dois fatores, sendo um em função do comprimento da rampa (L) e o outro em função da declividade média (S). Os fatores L e S foram calculados com base no Modelo Digital de Elevação pela ferramenta *Raster Calculator* no software Arcgis 10.3, baseando-se nas seguintes equações (6, 7 e 8), desenvolvidas por McRoberts et al. (2002) e por Moore e Wilson (1992).

$$L = (\lambda/22,13)^m \quad (6)$$

$$m = \beta/(1 + \beta) \quad (7)$$

$$\beta = \frac{\frac{\text{sen}\theta}{0.0896}}{[3(\text{sen}\theta)^{0.8} + 0.56]} \quad (8)$$

Onde λ é a projeção horizontal (m); o expoente m é a variável em função do comprimento da inclinação e θ é o ângulo de inclinação. O fator S foi calculado baseado na relação proposta por McCool et al. (1987), onde:

$$\begin{aligned} S &= 10.8 \text{ sen } \theta + 0.003 \quad \text{quando } \theta < 5^\circ \\ S &= 16.8 \text{ sen } \theta - 0.5 \quad \text{quando } 5^\circ \leq \theta \leq 10^\circ \\ S &= 21.91 \text{ sen } \theta - 0.96 \quad \text{quando } \theta \geq 10^\circ \end{aligned}$$

Após obter-se o fator L e o fator S, realizou-se a multiplicação dos mesmos por meio da ferramenta *Raster Calculator* no software ArcGis 10.3.

Os fatores C, referente às práticas de uso e cobertura do solo, e P, referente às práticas contra a erosão, foram estimados com base nos resultados obtidos por meio da reclassificação do *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), calculado por meio das bandas do vermelho e infravermelho próximo (bandas 3 e 4) do satélite GEOEYE.

O procedimento de obtenção das classes de uso e cobertura do solo por meio da imagem GEOEYE foi dividido em 5 etapas principais. A primeira etapa se refere ao pré-processamento das imagens e conferência da precisão geométrica das cenas, bem como aplicação de contraste e filtros para atenuação dos efeitos de sombras e nuvens. A segunda etapa foi baseada no cálculo do NDVI pela equação (9), proposta por Rouse et al. (1974):

$$NDVI = \frac{\rho_4 - \rho_3}{\rho_4 + \rho_3} \quad (9)$$

Onde ρ_4 e ρ_3 são as reflectâncias planetárias ao nível do satélite GEOEYE, para as bandas do infravermelho próximo e do vermelho, respectivamente.

Na terceira etapa, foi realizada a reclassificação dos valores de NDVI de acordo com as classes de vegetação presentes na bacia do córrego Marinheiro. Na quarta etapa, foi realizada a pós-classificação e refinamento do resultado obtido. Por último, na quinta etapa, realizou-se a validação

do mapeamento, por meio do cálculo do índice *Kappa* e da matriz de confusão, com base em 33 pontos obtidos *in loco*.

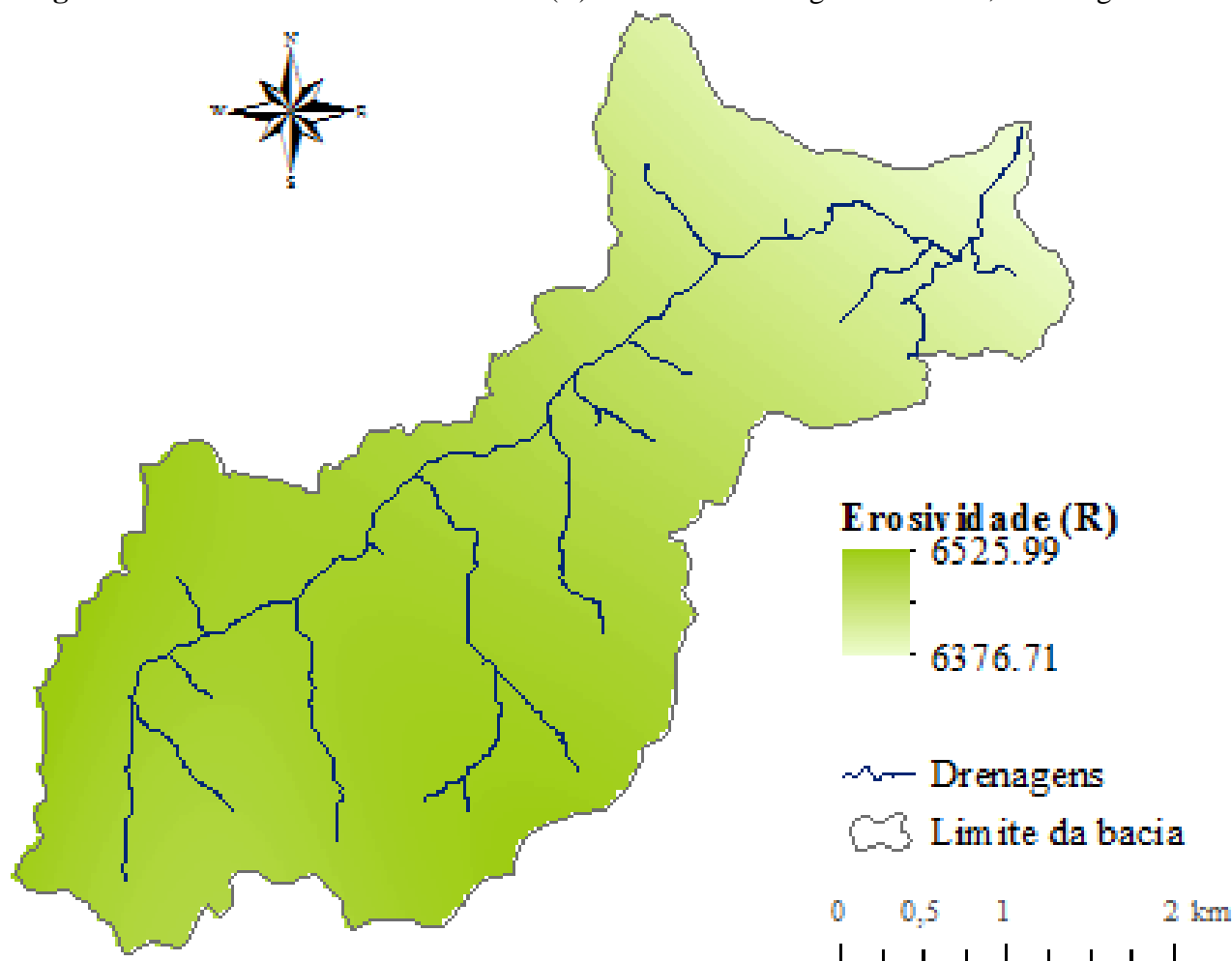
Após representar todos os fatores do modelo RUSLE em camada *raster*, foi possível calcular, espacializar e analisar a perda de solo na bacia do córrego Marinheiro, multiplicando-se pixel a pixel os valores dos fatores obtidos por meio do software ArcGis 10.3.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados calculados de erosividade para a bacia do Córrego Marinheiro apresentaram valor médio de 6.481,12 MJ. mm.ha⁻¹. h⁻¹. ano⁻¹ e variaram entre 6.376,7 e 6.525,9 MJ. mm.ha⁻¹. h⁻¹. ano⁻¹, com desvio padrão de 35,75, o que implica que esse fator não apresenta intervalos de variação distantes da média, provavelmente devido ao tamanho da bacia e às características da precipitação na região (Figura 3).

Observando a Figura 3, é possível identificar que os valores ligeiramente mais baixos de erosividade (Fator R) estão localizados mais próximos à foz do curso d'água principal e os valores ligeiramente mais altos estão localizados nas regiões da cabeceira e região central da bacia do córrego Marinheiro, demonstrando que os efeitos do impacto das gotas de chuva, combinados com a capacidade de transporte e escoamento superficial, podem ser ligeiramente maiores nestas áreas.

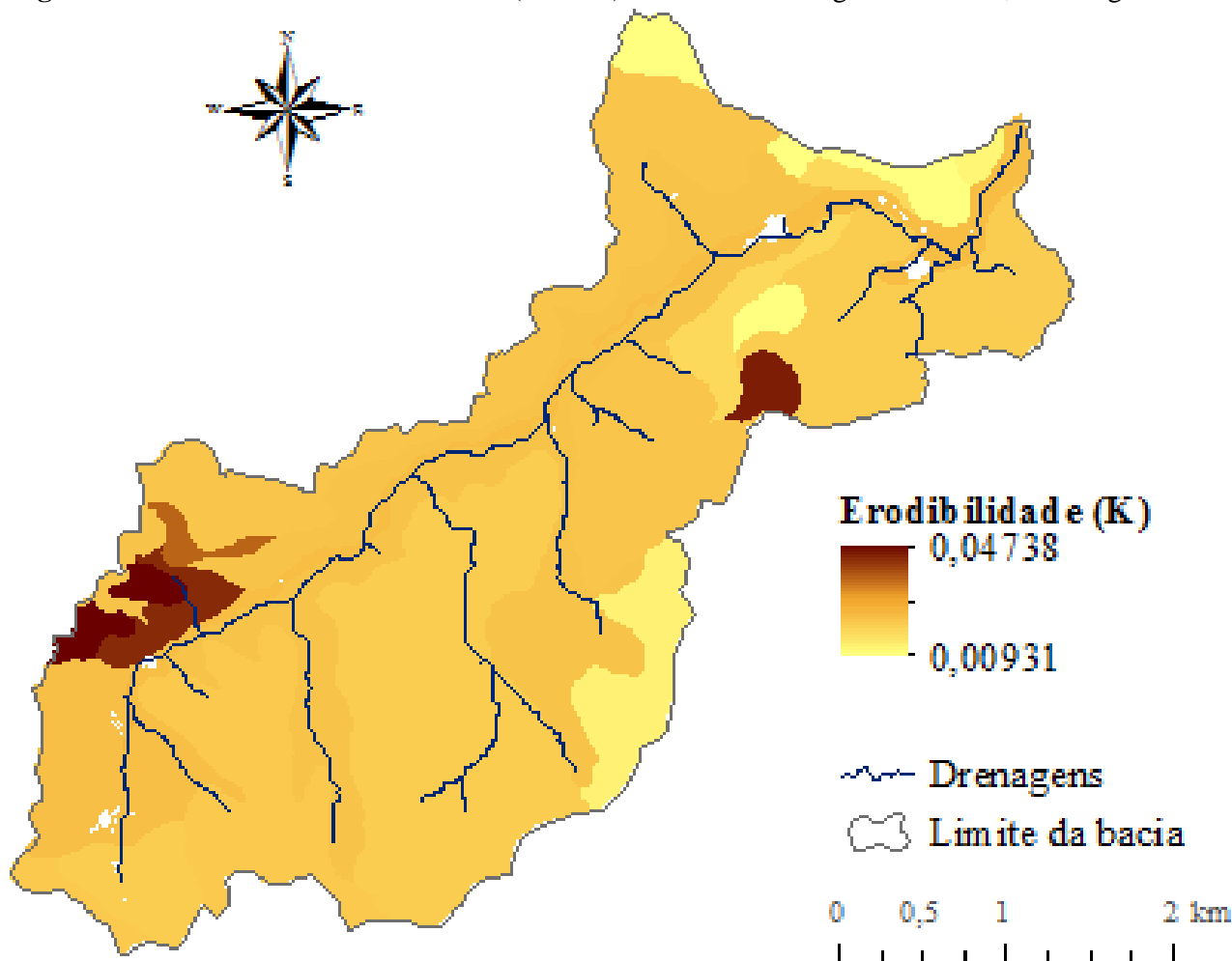
Figura 3 – Fator de erosividade da chuva (R) na bacia do córrego Marinheiro, Sete Lagoas-MG



Fonte: Elaborado pelos autores (2018).

O levantamento detalhado de solos na bacia do córrego Marinheiro permitiu calcular os valores detalhados de erodibilidade do solo (Fator K), apresentando valor médio de $0,0233 \text{ Mg ha h ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$, variando entre $0,00931$ e $0,0478 \text{ Mg ha h ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ (Figura 4). O desvio padrão de $0,0106$ indica que os valores de erodibilidade tendem a estar mais distantes do valor médio da área, o que pode ser explicado pela variabilidade de tipos de solos encontrados na bacia.

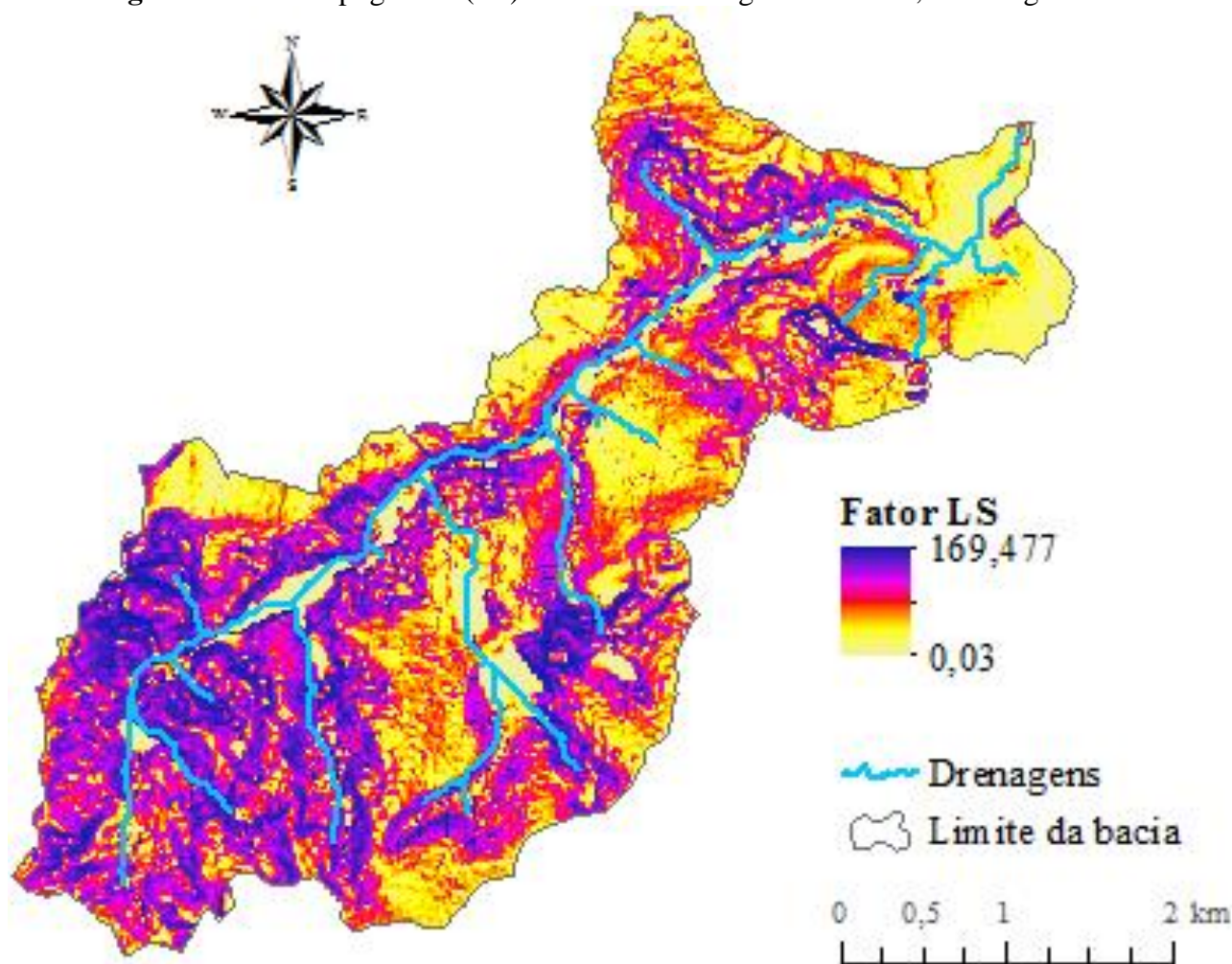
Figura 4 – Fator de erodibilidade do solo (Fator K) na bacia do córrego Marinheiro, Sete Lagoas - MG



Fonte: Elaborado pelos autores (2018).

Os maiores valores de erodibilidade de solos na bacia do córrego Marinheiro estão localizados em porções da região sudoeste e região nordeste da bacia (Figura 4), com áreas de solo predominantemente do tipo Chernossolo Háplico, com presença de afloramento rochoso, Cambissolo Háplico, Luvisolo Crômico e Nitossolo Vermelho. Os solos citados são tipicamente menos profundos, com permeabilidade lenta, o que favorece o arraste de partículas de solo em eventos de precipitação. Os baixos valores de K estão localizados em áreas com solos predominantemente do tipo Latossolo Vermelho, com características texturais tendendo a muito argilosas, com permeabilidade moderada a rápida. Nessas porções da bacia, a infiltração e armazenamento de água no solo favorecem o menor arraste de partículas de solo, comparados com as demais áreas do local.

Os valores do fator topográfico (LS) estão diretamente relacionados às características do relevo. Na bacia do córrego Marinheiro, o Fator LS variou entre 0,03 a 169,47 (adimensional) e apresentou desvio padrão de 2,34, indicando uma distribuição espacial pouco variável deste fator na área de estudo (Figura 5).

Figura 5 – Fator topográfico (LS) da bacia do córrego Marinheiro, Sete Lagoas-MG

Fonte: Elaborado pelos autores (2018).

Observou-se que os valores mais elevados de comprimentos da rampa, combinados com a declividade média (Fator LS), estão localizados em maior concentração na região da cabeceira da bacia, em regiões ao longo do curso d'água principal e partes da bacia com relevo de tendência fortemente ondulado a montanhoso (Figura 5).

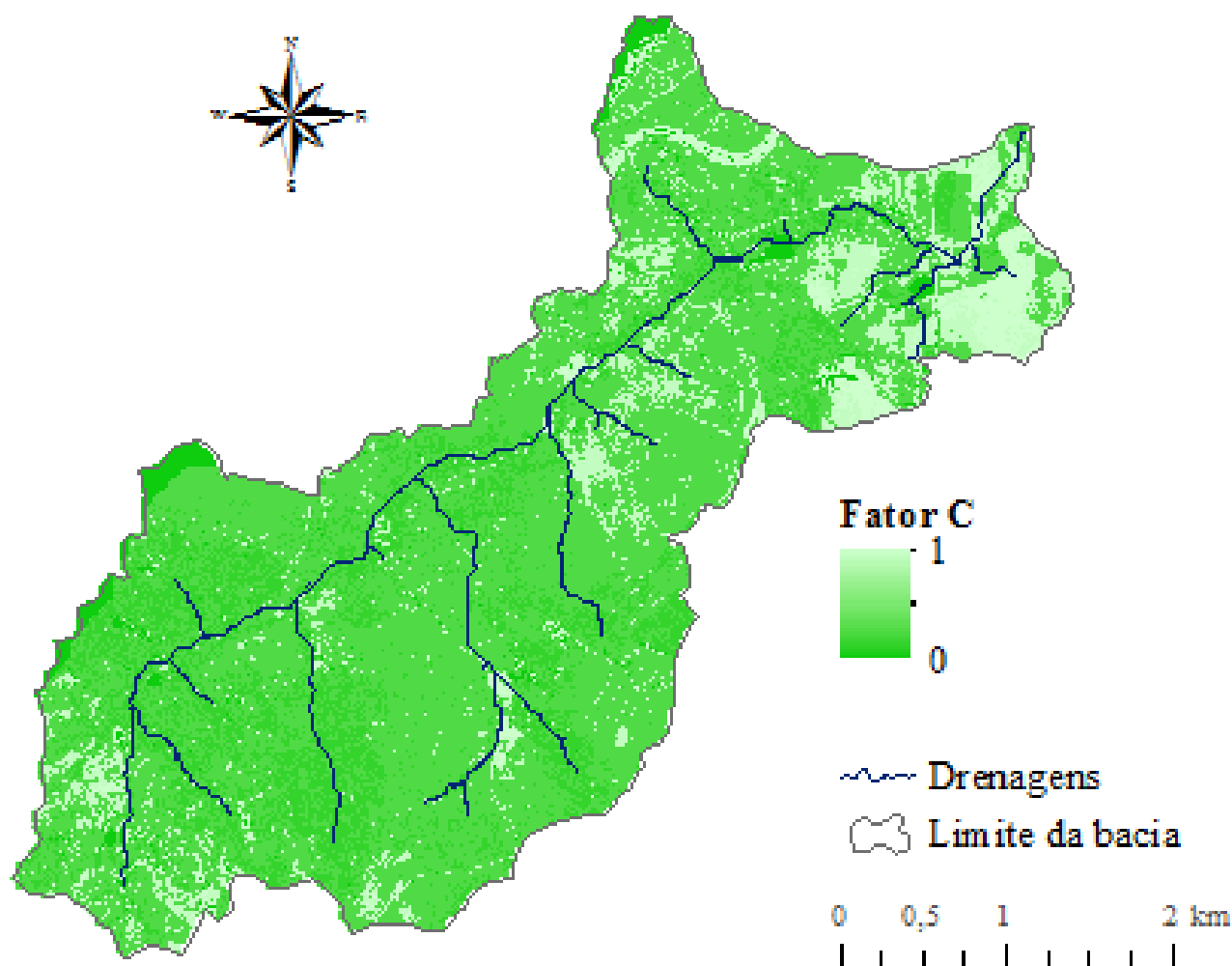
A classificação da imagem GEOEYE, por meio de NDVI, da bacia do córrego Marinheiro apresentou índice *Kappa* de 0,6853 e acerto geral de 75,8% (25 dos 33 pontos observados *in loco*), indicando que houve um acordo substancial entre o mapeamento realizado e a verdade de campo (GONG e HOWARTH, 1990; LANDIS e KOCH, 1977). Com base nos resultados do cálculo do NDVI na área de estudo, foi possível obter cinco classes de uso e cobertura do solo, quais sejam: i) Corpo hídrico; ii) Solo exposto; iii) Pastagens; iv) Cultivos; e v) Floresta.

O fator de práticas de uso e cobertura do solo (Fator C) está diretamente relacionado com a cobertura vegetal da área. Quanto maior a cobertura vegetal, maior a interceptação das gotas da água de chuva, contribuindo para a infiltração da água no solo e retardando o movimento de escoamento superficial. Na bacia foram atribuídos valores de 0,006 para as regiões de floresta; 0,012 para regiões de pastagens; 0,09 para regiões de cultivos e valor 1 para regiões com solo exposto (Figura 6).

Os valores mais elevados do Fator C concentram-se na porção nordeste da bacia, indicando que nessas áreas não há efeito de cobertura vegetal do solo, provavelmente devido à presença de práticas antrópicas para implantação de cultivos, contribuindo, assim, para aumento das taxas de perda de solo na área. Os valores mais baixos de C estão localizados da porção central da bacia e

região da cabeceira, indicando um maior efeito da cobertura do solo por vegetação, o que contribui para atenuação da taxa de perda de solo.

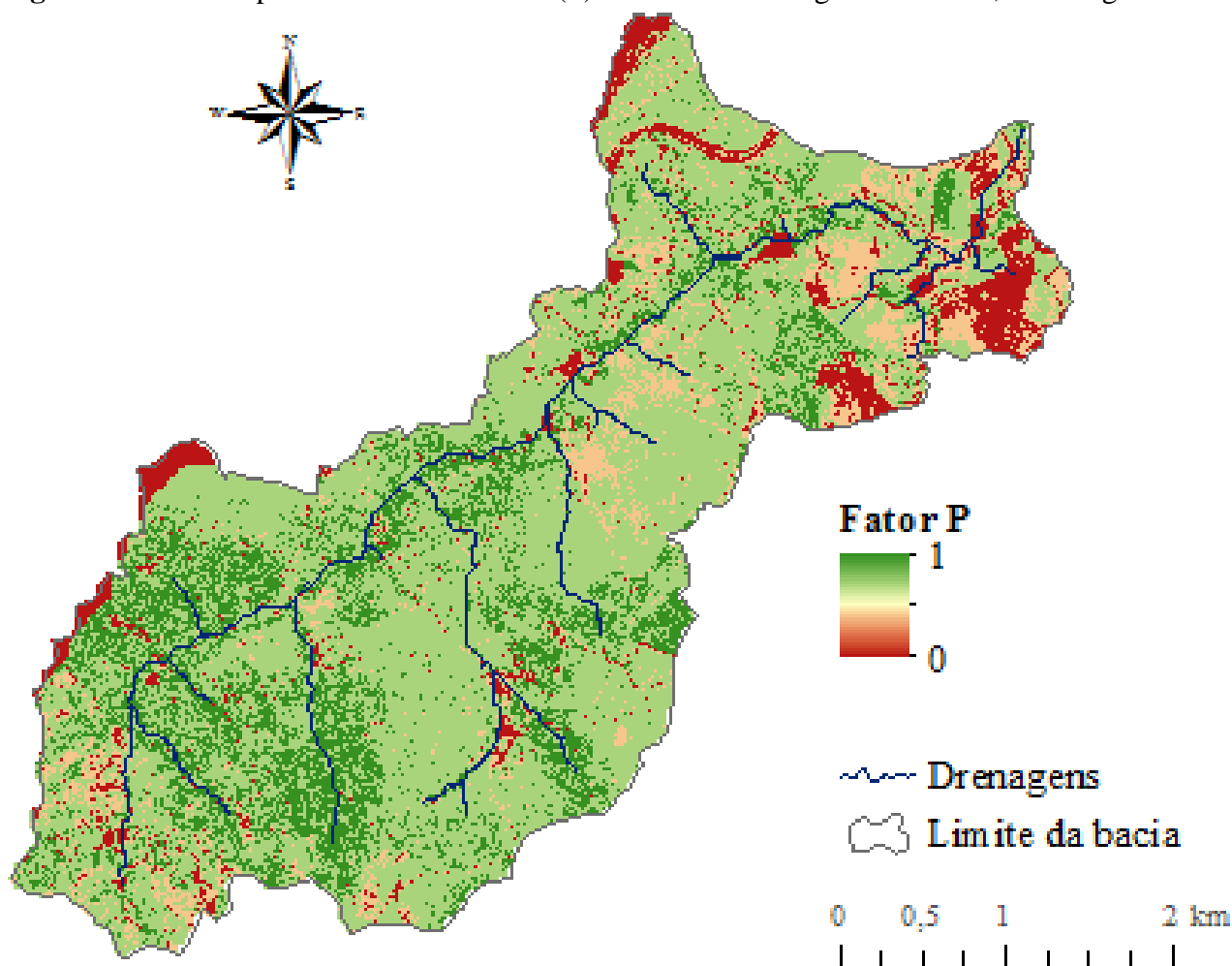
Figura 6 – Fator de práticas de uso e cobertura do solo (C) na bacia do córrego Marinheiro, Sete Lagoas – MG



Fonte: Elaborado pelos autores (2018).

O fator de práticas contra a erosão (Fator P) na bacia do córrego Marinheiro teve valores variando de 0 a 1. Estes foram estimados com base no tipo de uso e cobertura do solo. Nas áreas cultivadas, o valor de P atribuído foi 0,4; nas áreas de pastagens atribuiu-se valor de 0,7 e nas áreas de floresta foi atribuído valor 1. Para as demais áreas, atribuiu-se valor 0 (Figura 7).

Os valores próximos a 1 indicam as áreas com práticas de maior resistência à erosão e apresentam características de vegetação dos tipos floresta e pastagem. Por sua vez, os valores próximos a 0 indicam áreas com práticas de maior favorabilidade à erosão e apresentam características de áreas de solo exposto e áreas destinadas a cultivos.

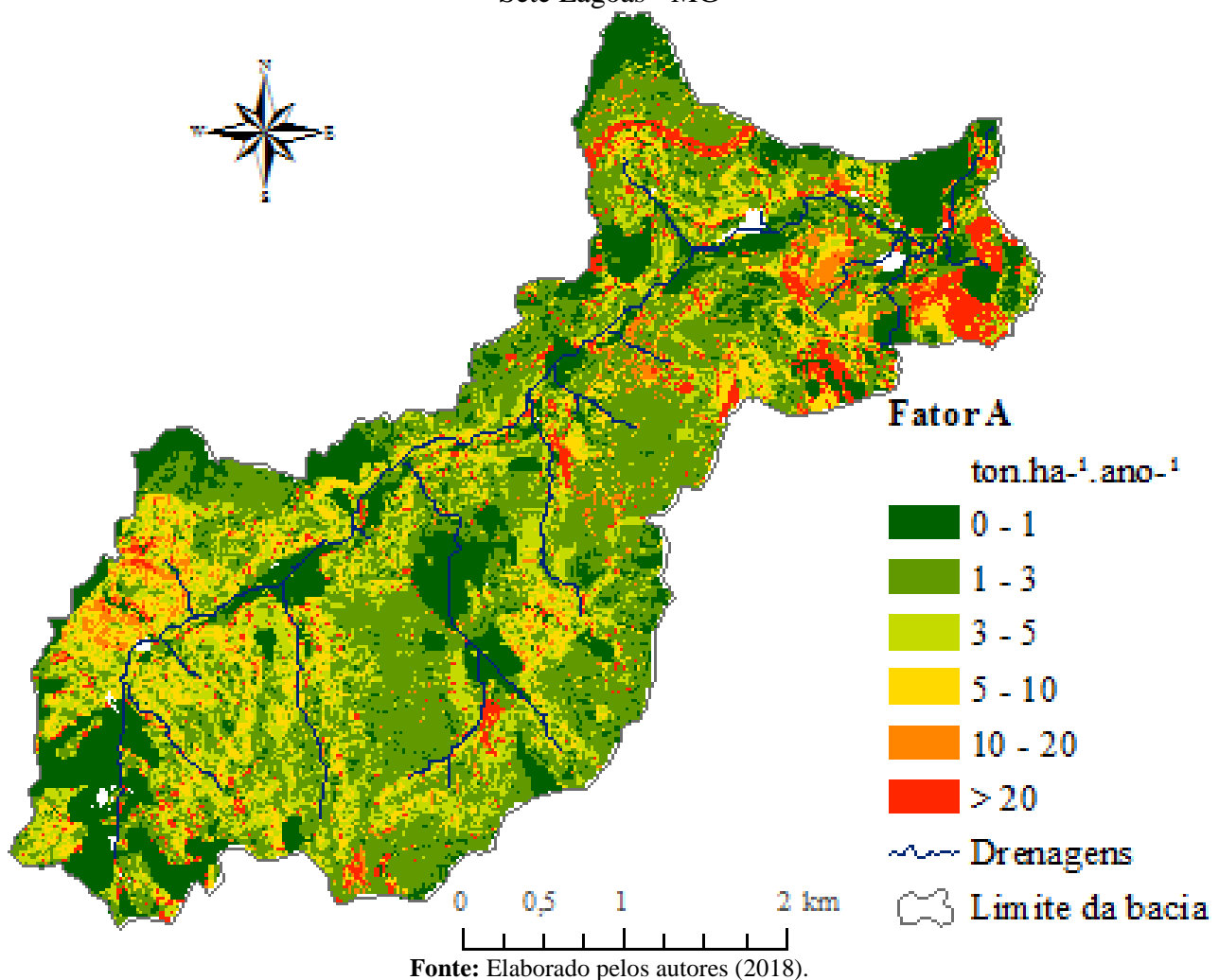
Figura 7 – Fator de práticas contra a erosão (P) da bacia do córrego Marinheiro, Sete Lagoas – MG

Fonte: Elaborado pelos autores (2018).

Os resultados obtidos para a perda anual de solos na bacia do córrego Marinheiro apresentaram valor médio estimado em $7,15 \text{ ton. ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$. Além disso, foi possível classificar e caracterizar os resultados obtidos para a área de estudo em seis categorias distintas (Figura 8), sendo estas: 0 a 1 (muito baixa); 1 a 3 (baixa); 3 a 5 (moderada); 5 a 10 (severa); 10-20 (alta); e acima de $20 \text{ ton. ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ (muito alta).

Observando a Figura 8 (Fator A), é possível identificar que as áreas próximas ao terço inferior da bacia, regiões norte e nordeste, apresentaram as maiores perdas potenciais anuais de solo, devido à falta de cobertura vegetal nativa do solo. Somado a esse fato, nessa porção da bacia são, historicamente, realizadas atividades relacionadas ao cultivo agrícola, além de apresentar trechos de rodovia e ferrovia, os quais dependiam da realização de cortes e aterros para suas respectivas implantações. Tais práticas e tipo de ocupações contribuem para a modificação da condição natural do relevo, favorecendo a maior perda de solos na área, conforme os resultados obtidos. Nas porções próximas à cabeceira da bacia, terço alto, o relevo é predominantemente declivoso, com características montanhosas e encostas íngremes, o que contribuí para o aumento da velocidade do escoamento superficial e o arraste de solo pela água da enxurrada. Nas porções centrais da bacia, que apresentam valores altos de perdas de solo, estão áreas com menor cobertura vegetal e declive acentuado.

Figura 8 – Distribuição espacial das categorias de perdas de solo na bacia do córrego Marinheiro, Sete Lagoas - MG



O resultado da perda anual de solo pode ser separado por categorias, classificadas entre “muito baixa” a “muito alta”. Os resultados indicam que 21,5% da área de estudo apresentam uma perda anual de solo muito baixa, em uma área de 318,1 hectares (Tabela 2). Essas áreas são locais onde os solos apresentam permeabilidade moderada a rápida, o fator comprimento e declividade da rampa são mais baixos, além de apresentar cobertura vegetal mais densa.

Tabela 2 – Classes de perda de solo na bacia do córrego Marinheiro, Sete Lagoas – MG

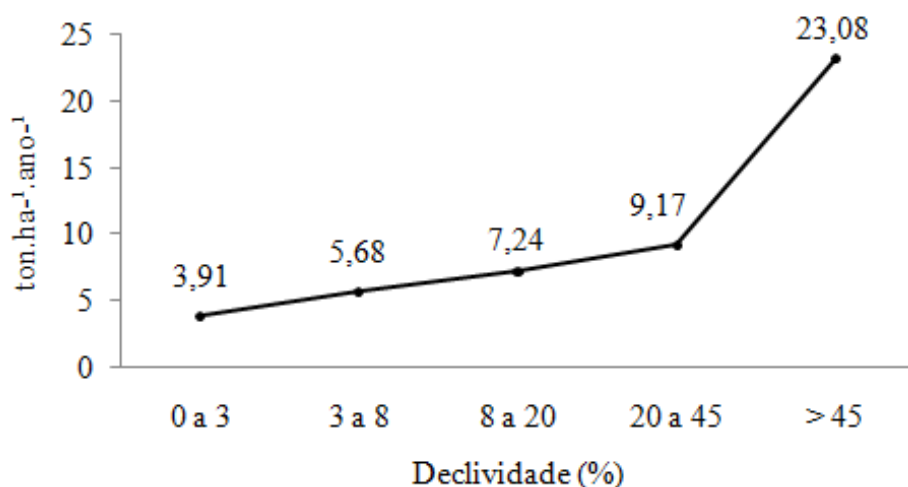
Classe de perda de solo (ton. ha ⁻¹ . ano ⁻¹)	Categoria	Área (Hectares)	%
0-1	Muito baixa	318,1	21,5
1-3	Baixa	594,5	40,2
3-5	Moderada	257,1	17,4
5-10	Severa	168,7	11,4
10-20	Alta	53,5	3,6
>20	Muito alta	88,2	6,0
Total		1.480	100

Fonte: Elaborado pelos autores (2018).

Observa-se que 40,2% da área de estudo apresentam uma perda de solo baixa (1 a 3 ton. ha⁻¹. ano⁻¹), correspondendo a 594,5 ha (Tabela 2). Já 17,4% da bacia apresentam uma perda anual de solo moderada, com 3 a 5 ton. ha⁻¹. ano⁻¹, o que corresponde a uma área de 257,1 ha. A categoria de perda de solo severa correspondeu a 11,4% da área (168,7 ha). A categoria alta contemplou 53,5 ha, correspondendo a 3,6% da área da bacia e a categoria muito alta apresentou 88,2 ha (6%) da área de estudo.

A perda de solo em diferentes classes de declividade na bacia do córrego Marinheiro foi avaliada e os resultados indicaram que o aumento da perda média de solos está diretamente relacionado com o aumento das classes de declividade (Figura 9).

Figura 9 – Gráfico das perdas média de solos em diferentes classes de declividades na bacia do córrego Marinheiro, Sete Lagoas - MG
Perdas média de solo



Fonte: Elaborado pelos autores (2018)

Observando a Tabela 3, é possível identificar que as classes de declividade com relevo plano (0 a 3 % de declividade) e suavemente ondulado (3 a 8%) apresentam as menores perdas médias de solo, com 3,91 e 5,68 ton. ha⁻¹. ano⁻¹, respectivamente. Em relevos ondulados, com declividade entre 8% a 20%, estima-se uma perda média de solo de 7,24 ton. ha⁻¹. ano⁻¹ e em relevos fortemente ondulados, com declividade de 20% a 45%, ocorre uma perda média de 9,17 ton. ha⁻¹. ano⁻¹.

Nas áreas de relevos acima de 45% ocorrem as maiores perdas potenciais médias de solo, com valores de, aproximadamente, 23,08 ton. ha⁻¹. ano⁻¹, o que pode ser explicado pelo fato de que em regiões montanhosas a velocidade do escoamento superficial é maior, elevando a quantidade de partículas de solo que podem sofrer arraste pela água. No caso específico da bacia do córrego Marinheiro, observou-se em campo uma ligeira predominância da erosão do tipo laminar em detrimento da erosão em sulcos.

Os resultados obtidos neste estudo podem ser comparados com recentes estimativas realizadas por diversos autores, em diferentes regiões (PAN e WEN, 2014; JIANG et al., 2015). Santos, Blanco e Pessoa (2015) utilizaram o modelo empírico RUSLE, para avaliar a tolerância de perda de solo, em um trecho da bacia do Igarapé da Prata, na Amazônia. Os autores estimaram uma perda média de solo de 5,12 ton. ha⁻¹. ano⁻¹ e, constataram que, 12% da área da bacia apresentam riscos ambientais elevados devido aos processos erosivos.

Estudos realizados para a microbacia do córrego Canabrava (com área de aproximadamente 4.500 ha) no município de Guaraciama - MG, estimaram que 30% da área da bacia encontram-se sujeitos a graves processos erosivos, com perdas acima de 12 t ha⁻¹ ano⁻¹, áreas caracterizadas, principalmente, por ausência de cobertura vegetal do solo e altas declividades (NERY e LIMA, 2013).

A avaliação da perda de solo no ano de 1984, para a bacia do córrego Rico, no Estado de São Paulo, utilizando-se a equação universal de perda de solo, demonstrou que a maior perda de solo foi entre 20,1 e 50 ton ha⁻¹ ano⁻¹ (em 26,57% da área) e, em 2011, a maior perda de solo foi entre 10,1 e 15 ton ha⁻¹ ano⁻¹ (em 27,65% da área). No mesmo estudo, foi possível concluir que a técnica aplicada se mostrou eficaz na representação espacial de áreas mais vulneráveis ao processo erosivo (COSTA et al., 2016).

4 CONCLUSÕES

A aplicação do modelo empírico RUSLE, neste estudo, demonstrou-se adequada para a estimativa da erosão hídrica potencial nesta bacia de pequeno porte e revelou que a estimativa da taxa média de perda anual de solos na bacia do córrego Marinho foi de 7,15 ton ha⁻¹ ano⁻¹. Espacialmente, a área apresenta predominância das classes baixa e muito baixa de perda anual de solo (61,7% da bacia). No entanto, 21% da área apresentam riscos ambientais, por terem classes do tipo severa a muito alta, com risco de processos erosivos. Destaca-se que, segundo o modelo, nas áreas onde houve a implantação de atividades antrópicas, as perdas potenciais anuais de solos são mais acentuadas.

Os métodos descritos no presente estudo permitiram uma compreensão mais clara da relação entre a erosão e seus principais fatores causais, podendo ser úteis para planejamento e para implantação de práticas e manejos que favoreçam a conservação do solo e da água.

AGRADECIMENTOS

À FAPEMIG pelo apoio financeiro, ao Laboratório de Solos e Meio Ambiente do IGC/UFMG, à EMBRAPA Milho e Sorgo e ao Centro Aeroespacial Alemão (DLR) pela disponibilização do modelo digital de elevação (TanDEM-X) do projeto IDEM_HYDR0093.

REFERÊNCIAS

- AMARAL, J. R. do. **Caracterização físico-hídrica dos solos da bacia do Córrego Marinho, Sete Lagoas – MG**. Dissertação (Mestrado em Geografia – Análise Ambiental) - Departamento de Geografia, Universidade Federal de Minas Gerais. 2018. 156 f.
- ARRAES, C. L.; PAES BUENO, C. R.; TARLE PISSARRA, T. C. Estimativa da erodibilidade do solo para fins conservacionistas na microbacia córrego do Tijuco, SP. **Bioscience Journal**, p. 849-857, 2010.
- AVANZI, J. C. **Modelagem do escoamento superficial e erosão hídrica em uma microbacia hidrográfica na região dos Tabuleiros Costeiros**. Dissertação (Mestrado em Agronomia)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2005. 68 p.
- BATISTA, P. V. G. **Modelagem da erosão hídrica e métodos de interpolação de batimetria fluvial na bacia do Alto Rio Grande (MG)**. 2016. 214 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2016.
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 8. ed. São Paulo:Ícone Ed., 2012. 355p.
- COSTA, B. DE O., DE OLIVEIRA, G. S., PISSARA, T. C. T., CAMPOS, S., WERNER, A., SANTOS, J. P., e VANZELA, L. S. Factors of soil erosion in the Córrego Rico watershed, São Paulo, Brazil. **Irriga**, v. 21, n. 3, p. 530-544, 2016.

DENARDIN, J. E. **Erodibilidade de solo estimada por meio de parâmetros físicos e químicos**. 1990. 81 f. Tese (Doutorado em Agronomia - Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1990.

ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE (ESRI). **ArcGIS for Desktop**. Versão. 10.3. Redlands: ESRI, 2013.

FARHAN, Y.; NAWAISEH, S. Spatial assessment of soil erosion risk using RUSLE and GIS techniques. **Environmental Earth Sciences**, v. 74, n. 6, p. 4649-4669, 2015.

GONG, P.; HOWARTH, P. J. An assessment of some factors influencing multispectral land-cover classification. **Photogrametric Engineering and Remote Sensing**, v. 56, n. 5, p. 597-603, 1990.

Instituto Nacional de Meteorologia – INMET. **BDMEP - Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>>. Acesso em: 02 de Jan. 2017.

JIANG, L., YAO, Z., LIU, Z., WU, S., WANG, R., & WANG, L. Estimation of soil erosion in some sections of Lower Jinsha River based on RUSLE. **Natural Hazards**, v. 76, n. 3, p. 1831-1847, 2015.

JORGE, J. A. **Física e manejo dos solos tropicais**. Campinas, Brasil: Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, p. 328, 1986.

KARAMESOUTI, M., PETROPOULOS, G. P., PAPANIKOLAOU, I. D., KAIRIS, O., & KOSMAS, K. Erosion rate predictions from PESERA and RUSLE at a mediterranean site before and after a wildfire: comparison & implications. **Geoderma**, v. 261, p. 44-58, 2016.

LANDIS, J.; KOCH, G. G. The measurements of agreement for categorical data. **Biometrics**, v.33, n.3, p.159-179, 1977.

LORANDI, R.; TAKEMOTO, F.; SALVADOR, N. N. B.; TORRESAN, F. E. Carta do potencial à erosão laminar da parte superior da Bacia do Córrego do Monjolinho (São Carlos, SP). **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro, n. 53, p. 111-117, 2001.

MATOS, T. V. S. **Determinação de áreas de vulnerabilidade à erosão hídrica com base na equação universal de perda de solo (USLE)**. 2015. 116 p. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente, Saneamento e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

McCOOL, D. K., BROWN, L. C., FOSTER, G. R., MUTCHLER, C. K., & MEYER, L. D. Revised slope steepness factor for the Universal Soil Loss Equation. **Transactions of the ASAE**, v. 30, n. 5, p. 1387-1396, 1987.

McROBERTS, Ronald E.; NELSON, Mark D.; WENDT, Daniel G. Stratified estimation of forest area using satellite imagery, inventory data, and the k-Nearest Neighbors technique. **Remote Sensing of Environment**, v. 82, n. 2, p. 457-468, 2002.

MEDEIROS, G. de O. R.; GIAROLLA, A.; SAMPAIO, G. e MARINHO, M.A. Diagnosis of the Accelerated Soil Erosion in São Paulo State (Brazil) by the Soil Lifetime Index Methodology. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, Viçosa, v. 40, e0150498, 2016.

MERRITT, W. S.; LETCHER, R. A.; JAKEMAN, A. J. A review of erosion and sediment transport models. **Environmental Modelling & Software**, v. 18, n. 8, p. 761-799, 2003.

MOORE, I. D.; WILSON, J. P. Length-slope factors for the Revised Universal Soil Loss Equation: Simplified method of estimation. **Journal of soil and water conservation**, v. 47, n. 5, p. 423-428, 1992.

MOREIRA, M. C., PRUSKI, F. F., OLIVEIRA, T. E. C. D., PINTO, F. D. A. D. C., & SILVA, D. D. D. NetErosividade MG: rainfall erosivity for Minas Gerais state, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 3, p. 1349-1353, 2008.

NERY, C. V. M.; LIMA, F. A. Uso do Geoprocessamento na determinação das perdas de solo por erosão laminar na Bacia Hidrográfica do Córrego Canabrava. **Anais... XVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO – SBSR**, Foz do Iguaçu PR, 13 a 18 de abril de 2013, INPE, p.4002-4008.

OLIVEIRA, A. R. **Relações solo-paisagem e modelo de predição de solos da bacia do córrego marinho, Sete Lagoas (MG)**. Dissertação de Mestrado. Belo Horizonte, IGC/UFMG.74p. 2016.

PAN, J.; WEN, Y. Estimation of soil erosion using RUSLE in Caijiamiao watershed, China. **Natural hazards**, v. 71, n. 3, p. 2187-2205, 2014.

RENARD K. G.; FOSTER G. R.; WEESIES G. A.; MCCOOL D. K.; YODER D. C. **Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)**. Washington, DC: US Government Printing Office, 1997.

ROUSE, J. W.; HAAS JR., R. H.; DEERING, D. W.; SCHELL, J. A.; HARLAN, J. C. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation, NASA/GSFC type **III final report**: Greenbelt, Maryland, NASA, 1974, 371p.

SANTOS, D. B. O; BLANCO, C. J. C.; PESSOA, F. C. L. RUSLE. Determinação da Tolerância de Perda de Solo. **Biota Amazônia**, v. 5, n. 4, p. 78-83, 2015.

SCOLFORO, J. R.; MELLO, J. M.; SILVA, C. P. de C. (Ed.). **Inventário Florestal de Minas Gerais: Floresta Estacional Semidecidual e Ombrófila - Florística, Estrutura, Diversidade, Similaridade, Distribuição Diamétrica e de Altura, Volumetria, Tendências de Crescimento e Áreas aptas para o Manejo Florestal**. Lavras: UFLA, 2008. cap. 5, p.255-335.

WESSEL, B. **TanDEM-X Ground Segment** – DEM Products Specification Document. Project Report. EOC, DLR, Oberpfaffenhofen, Germany, Public Document TD-GS-PS-0021, Issue 3.0. 2013. Disponível em: <<http://elib.dlr.de/93565/>>.

WISCHMEIER, W. H.; JOHNSON, C. B.; CROSS, B. V. A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, v. 26, n. 5, p. 189-193, 1971.

WISCHMEIER, W. H., e SMITH, D. D. **Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning**. U.S. Department of Agriculture, Washington, DC, 1978.

Data de submissão: 14.05.2017

Data de aceite: 18.09.2018

License information: This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.