

Desenvolvimento de Método de Avaliação da Erosão do Solo para a Bacia-piloto da Água da Cachoeira

Kazutoki ABE¹

Hiroataka OCHIAI¹

Eliane Akiko HONDA²

Edison Adriano BERTO²

RESUMO

Para solucionar problemas relacionados com a erosão do solo em áreas extensas, há a necessidade de avaliar, quantitativa e qualitativamente, a sua ocorrência em nível de bacia hidrográfica ou áreas maiores. A USLE é usualmente empregada como um método simples e prático para estimar a erosão do solo em vertentes e parcelas, mas seus resultados são de difícil extrapolação em nível de bacia hidrográfica. O método da USLE, aliado às informações geográficas obtidas pela técnica de GIS, resultou em um modelo de simulação de erosão do solo que abrange uma bacia inteira ou região de maior extensão. Esse modelo foi aplicado na bacia-piloto da Água da Cachoeira, que foi alvo de ensaios do Projeto de Pesquisa em Conservação de Florestas e do Meio Ambiente e foram efetuadas avaliações de erosão do solo. Tomando-se como referência os resultados dos ensaios e as condições de uso do solo em 1993, estimou-se que, nesse ano, a erosão ocorrida na bacia foi de 120 mil toneladas.

Palavras-chave: bacia hidrográfica, erosão do solo, GIS, USLE.

ABSTRACT

Quantitative and qualitative assessments of soil loss in watersheds are essential for erosion management planning. The Universal Soil Loss Equation (USLE) is widely applied as a simple and practical method to estimate soil erosion. Results from experimental plots, however, cannot be readily

¹ Forestry and Forest Products Research Institute, 305, Ibaraki, Japão.

² Floresta Estadual de Assis, Caixa Postal 104, CEP 19800-000, Assis, SP, Brasil.

extrapolated to an entire watershed. In this study, the USLE method was combined with the use of Geographic Information Systems (GIS), and a model suitable for soil erosion simulation in entire watersheds or larger areas was developed. The application of the model to the Agua da Cachoeira watershed resulted in an estimated total soil loss of 120,000 metric tons in 1993.

Key-words: GIS, soil erosion, USLE, watershed.

INTRODUÇÃO

No Estado de São Paulo, Brasil, o desmatamento para a pecuária e para ampliação de terras agrícolas avançou em ritmo acelerado e a taxa de área florestal decresceu de maneira vertiginosa nas últimas décadas. Isto também ocorreu no oeste paulista, onde extensas áreas agrícolas são ocupadas principalmente por cana-de-açúcar e soja, com agricultura mecanizada e intensiva. Nesse sistema agrícola de grandes proporções, o preparo do solo expõe extensas áreas descobertas, que ficam assim sujeitas à ação erosiva do ambiente. Esse fato, aliado à característica do solo da região, cuja composição granulométrica em grande parte é de areia, resulta em alta suscetibilidade à erosão, que se mostra em todas as suas feições. Além de reduzir a capacidade produtiva do solo e provocar danos à agricultura, a erosão do solo traz outros problemas igualmente alarmantes: contaminação da água, ressecamento de nascentes, assoreamento de represas e rios, ocorrência de enchentes, entre outros.

No Projeto de Pesquisa em Conservação de Florestas e do Meio Ambiente, iniciado em 1993, foi decidida a implantação de parcela-padrão para estudos erosivos, visando o uso dos resultados na Equação Universal de Perda de Solo (doravante, USLE). Nestas parcelas, recobertas com floresta, cultura agrícola ou descoberta, estão sendo monitoradas a água de superfície e sub superfície, e a erosão que aí ocorre. Entretanto, o método limita-se ao cálculo de erosão de uma área restrita, como uma parcela-padrão ou uma vertente, sendo necessário aumentar a abrangência da estimativa para avaliar a produção de sedimentos em escala de bacia hidrográfica ou áreas maiores.

No presente trabalho foi desenvolvido um modelo de simulação de erosão de solo em bacia hidrográfica, aliando as informações relativas à erosão obtidas pela USLE às informações de geomorfologia, solo, vegetação, uso do solo etc., obtidas pelo Sistema de Informação Geográfica (doravante, GIS).

MODELO DE SIMULAÇÃO DE EROÇÃO DO SOLO PARA BACIAS HIDROGRÁFICAS

1. Equação Universal de Perda de Solo (USLE)

Nesse modelo foi empregada a USLE, que permite estimar a erosão do solo em uma parcela ou uma vertente. A USLE é expressa pela equação (1) e, mediante o cálculo de cada fator, baseado em dados estatísticos, poderá ser obtida a erosão anual do solo (Wischmeier & Smith, 1978).

$$A = R \times K \times L \times S \times C \times P \dots\dots\dots(1)$$

Onde,

A: erosão anual do solo

R: fator de erosividade da chuva

K: fator de erodibilidade do solo

L: coeficiente de comprimento da rampa

S: coeficiente de declividade

C: fator de cobertura e manejo

P: fator de práticas de conservação

A: é a erosão anual do solo e é estimada mediante o cálculo dos demais coeficientes.

R: é o fator de erosividade da chuva, que expressa a energia do impacto das suas gotas e é calculado empregando dados pluviométricos anuais.

K: é o fator de erodibilidade do solo e expressa o potencial do solo em ser erodido.

C: é o coeficiente de cobertura e manejo. Expressa o quanto a cobertura e o manejo, referentes a uma cultura agrícola, pastagem ou floresta, são capazes de evitar a erosão superficial. É um fator adimensional e adota-se valores entre 0 a 1,0.

L: é um coeficiente definido pelo comprimento da rampa. Quanto mais longo for o declive, maior será o valor de L, indicando que a ocorrência da erosão será mais intensa.

S: é o coeficiente que expressa a influência da declividade sobre a erosão. Quanto maior a inclinação da superfície, maior será o valor de S. Os coeficientes de comprimento de rampa L e o coeficiente de declividade, juntos, determinam o fator topográfico.

A erosão pode ser calculada substituindo nas equações (2) e (3) o comprimento do declive (l) e a inclinação (θ) da rampa cuja erosão pretende-se estimar.

$$L = (1 / 22,1)^m, \text{ (m:coeficiente definido pelo comprimento da rampa)} \dots\dots\dots(2)$$

$$S = 65,41 \sin 2\theta + 4,56 \sin \theta + 0,065 \dots\dots\dots(3)$$

P: é o fator de práticas de conservação, que expressa os efeitos da implantação de medidas, estruturais e não estruturais, contra erosão. Em terras brasileiras, é freqüente a execução de terraços de 2m ou 3m de altura, acompanhando a curva de nível, com a finalidade de diminuir a quantidade e a velocidade da água do escoamento superficial, evitando assim a ocorrência de erosão. Entretanto, são raros os casos em que medidas contra erosão superficial dessa natureza são executadas nas florestas. Em razão disso, essas medidas não foram consideradas para o efeito dessa pesquisa. Para o P, adota-se um valor entre 0 e 1,0. Quando a obra de contenção permite evitar totalmente a erosão superficial, o valor do P é 0 (zero) e quando não apresenta nenhum efeito o valor é 1,0. Casos de não implantação de nenhuma medida o valor também é 1,0.

2. O modelo para simulação

O cálculo da erosão do solo de uma bacia segundo o modelo de simulação desenvolvido segue o seguinte procedimento (Figura 1).

1. Coleta, pelo GIS, de informações relacionadas à erosão do solo, tais como: Modelo Digital de Elevação (doravante, DEM), mapa de solo, mapa de vegetação etc.
2. Subdivisão da bacia em quadrantes, utilizando o DEM.
3. Cálculo dos coeficientes de comprimento da rampa e da declividade média do quadrante, a partir do comprimento e declividade de cada um.
4. Cálculo do fator de cobertura e manejo a partir de informações sobre as condições de vegetação de cada quadrante, obtidas do mapa de vegetação ou mapa de uso do solo.
5. Cálculo da erodibilidade do solo a partir de informações sobre o tipo de solo de cada quadrante, obtidas do mapa de solo.
6. Cálculo do fator de erodibilidade da chuva, a partir de dados pluviométricos anuais.

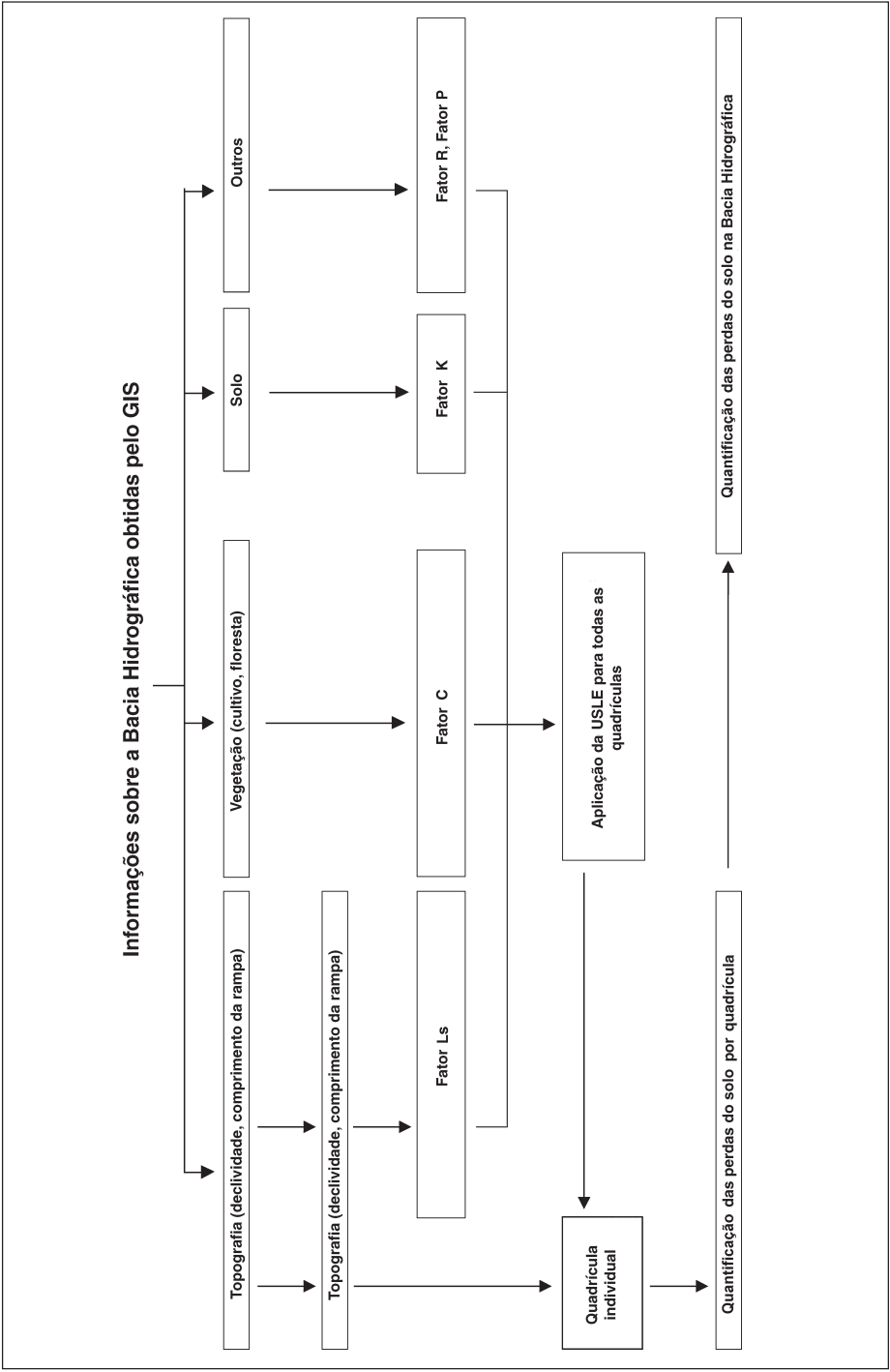


Figura 1. Modelo esquemático da simulação para avaliar a erosão do solo de uma bacia a partir da USLE.

7. Identificação do tipo de obra de contenção de erosão do solo, por exemplo terraceamento, e definir o fator de práticas de conservação. Este fator não foi considerado nessa pesquisa, optando-se pelo uso de modelo para simulação na ausência de intervenção humana para prevenção da erosão.
8. Substituição, na USLE, dos coeficientes definidos para todos os declives e calcular a erosão do solo para cada quadrante.
9. Efetuar o somatório da erosão do solo de cada quadrante, obtendo o volume de erosão em toda a bacia.

3. O fator de erodibilidade do solo K e o fator de cobertura e manejo C

O fator K e o fator C podem ser obtidos por meio de parcela-padrão para estudos de erosão, com 22,1 m de comprimento e 9% de declividade. Parcelas-padrão instaladas na Floresta Estadual de Assis estão em processo de obtenção destes dados.

3.1. Fator de erodibilidade do solo K

Para obter o fator K, é efetuada a medição do volume de sedimento acumulado A ao longo do ano, em parcela-padrão descoberta, simulando o solo após o preparo e mantendo-o livre de vegetação. O fator R é calculado a partir de dados pluviométricos. Na parcela-padrão, os integrantes do fator topográfico L e S, fator de cobertura e manejo C e fator de prática conservacionista P são todos equivalentes a 1,0. Desta forma, a equação USLE expressa pela equação (1) pode ser expressa conforme a equação (4):

$$K = A/R \dots\dots\dots(4)$$

Substituindo na equação (4) os fatores R e A medidos, será obtido o valor do fator K. Parcelas-padrão instaladas na Floresta Estadual de Assis estão em processo de obtenção destes dados para a região.

3.2. Fator de cobertura e manejo C

Ao efetuar a medição do volume anual de erosão A e do fator R em uma parcela-padrão, cultivada com cultura agrícola ou vegetada com floresta, os valores de S, L e P adotados serão 1,0 e o valor de C poderá ser calculado através da equação (5). O fator C é um valor adimensional e adota-se entre 0 e 1,0. Na presente pesquisa, os dados obtidos em parcelas-padrão na Floresta Estadual de Assis estão sendo armazenados para cálculo do valor de C em reflorestamento de árvores perenes e culturas típicas da região.

$$C = A / (K \times R) \dots\dots\dots(5)$$

4. Método de subdivisão e classificação da bacia em planos de declive

Para aplicar a USLE em toda a bacia hidrográfica na qual pretende-se obter o volume de erosão, a área foi subdividida em planos de declive utilizando o DEM. Os itens 1 a 4 descrevem o método.

1. As curvas de nível do mapa topográfico são lidas, obtendo-se os dados vetoriais para elaboração do DEM por meio do GIS. O DEM é uma figura composta por uma malha quadriculada sobre a área-alvo ou bacia-alvo, com valores numéricos inseridos tomando como valor representativo a altitude do centro da malha. A Figura 2 esquematiza a obtenção do DEM. Na presente pesquisa, foi elaborado o DEM de malha de 100 x 100 m (1 ha de área) da bacia-piloto Água da Cachoeira.
2. Em seguida, o DEM é utilizado para verificar, caso ocorra escoamento superficial, para qual malha o fluxo é direcionado. Identifica-se então a linha de fluxo (Figura 3).
3. O canal de drenagem é configurado quando a área de acúmulo de água dentro da bacia adquire uma determinada grandeza, e então a malha em que houve a formação do canal de drenagem é extraída utilizando o DEM. Considerando-se que na bacia-piloto desta pesquisa há formação de canal permanente quando a área de acúmulo de água atinge valores próximos a 4 ha, calculou-se a área de acúmulo de água em todas as malhas e extraídas aquelas que apresentaram área de acúmulo superior a 5 ha (5 malhas). A Figura 4 mostra os canais de drenagem obtidos pelo DEM.
4. As malhas pertencentes à mesma rede de drenagem foram consideradas parte de uma mesma vertente. A Figura 5 mostra as vertentes classificadas, indicando cada vertente com a mesma letra. Para cada vertente, calcula-se o comprimento da rampa e o ângulo de inclinação e assim são obtidos o coeficiente de comprimento de rampa L e o coeficiente de declividade S.

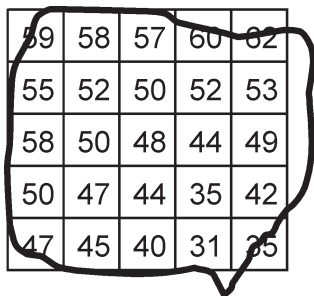


Figura 2. Desenho de simulação do DEM (os valores são altitudes).

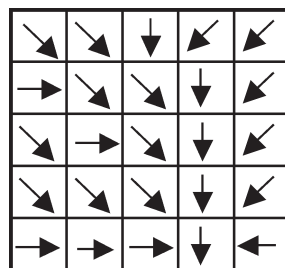


Figura 3. Linhas de escoamento desenhadas a partir do DEM.

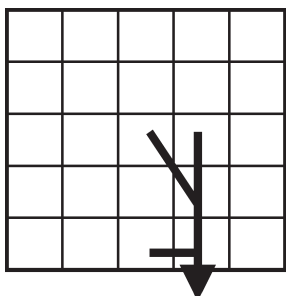


Figura 4. Malha de curso de água com convergência do escoamento superficial de mais de 5 malhas.

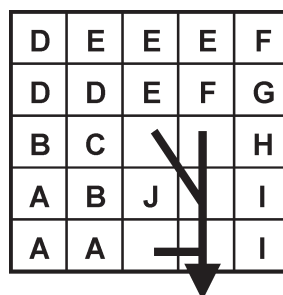


Figura 5. Planos de declive classificados dentro da bacia (A, B, C, ***, cada letra indica um plano).

5. Cálculo do volume de erosão do solo na bacia hidrográfica

Pela subdivisão da bacia em vertentes, empregando o método descrito, é obtido o fator topográfico da USLE. Paralelamente, a identificação do tipo de solo de cada declive pelo mapa de solo permite definir o fator de erodibilidade K dessa vertente, assim como a identificação de plantas e vegetação de cada vertente pelo mapa de uso do solo ou mapa de vegetação permite a obtenção do fator de cobertura e manejo C.

Desta forma, torna-se possível calcular o volume de erosão do solo para todos os planos de declive, aplicando a USLE.

AVALIAÇÃO DO VOLUME DE EROSIÃO DE SOLO NA BACIA-PILOTO DA ÁGUA DA CACHOEIRA

1. Características da bacia-piloto da Água da Cachoeira

A bacia-piloto da Água da Cachoeira, com área aproximada de 3.700 ha, está localizada a 5km leste do centro da cidade de Paraguaçu Paulista. A Figura 6 mostra os limites topográficos e a distribuição dos seus canais de drenagem. A altitude máxima da bacia é 609m e a mínima 440m. A inclinação média do leito do rio é de 1°, e a região descreve uma topografia suave formada por colinas.

O uso do solo foi classificado em três tipos: agricultura, pastagem e floresta. A Figura 7 mostra a mudança de uso do solo a partir da leitura de fotografias aéreas tiradas nos anos de 1962, 1972, 1984, 1993. A Tabela 1 mostra a proporção, em área, dos três tipos de uso do solo.

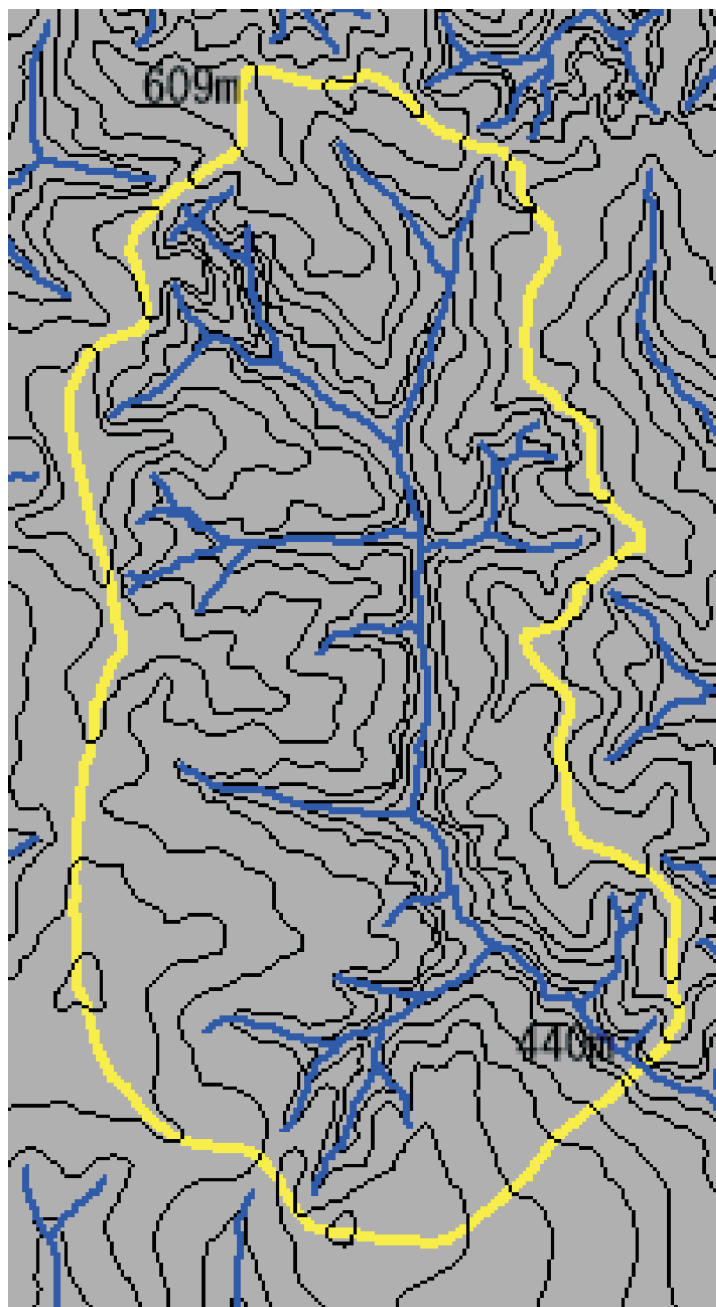


Figura 6. Bacia-piloto da Água da Cachoeira, Paraguaçu Paulista, SP.

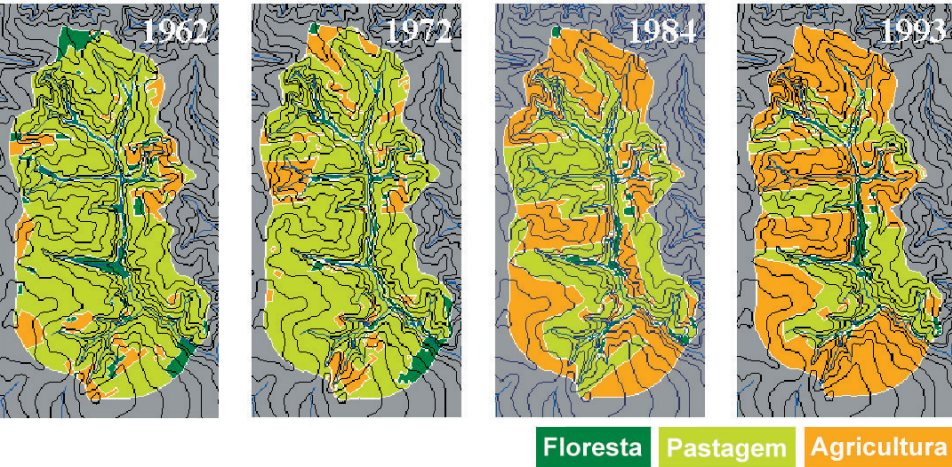


Figura 7. Evolução de uso do solo da bacia-piloto da Água da Cachoeira a partir da leitura de fotografias aéreas.

Tabela 1. Variação da proporção de área por uso do solo da bacia-piloto da Água da Cachoeira, Paraguaçu Paulista, SP.

Uso do solo	Ano			
	1962	1972	1984	1993
Pastagem	79	77	55	32
Agricultura	13	16	41	63
Floresta	8	7	4	5

2. Estabelecimento de condições de cálculo do volume de erosão do solo pelo modelo de simulação

O DEM da bacia-piloto foi elaborado utilizando o GIS, a partir das curvas de nível do mapa de geomorfologia 1:50.000, mostrado na Figura 6. O tamanho da malha é de 100m x 100m. A Figura 8 mostra o mapa da bacia-piloto, desenhado utilizando o DEM. Os pontos de maior altitude estão indicados em vermelho e os de menor altitude em azul. Utilizando esse DEM, a bacia foi subdividida em várias vertentes e os seus fatores topográficos, calculados.

Para o fator erodibilidade K foi empregado o valor $K=0,176$ (ton.hora/m².tonf), valor médio do latossolo, de presença bastante distribuída na região

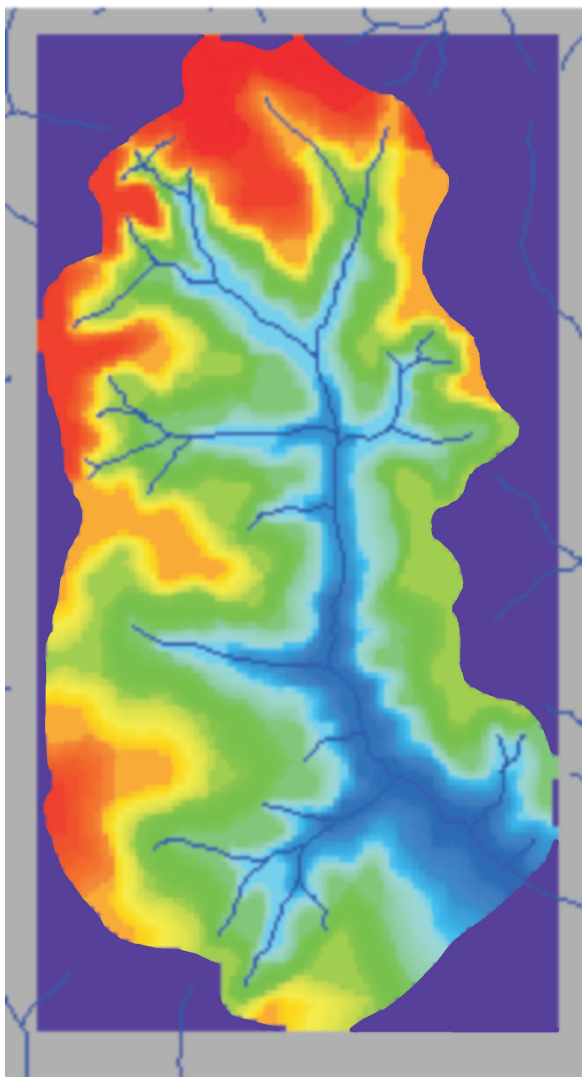


Figura 8. Bacia piloto da Água da Cachoeira desenhada pelo DEM.

(Siviero & Coiado, 2002). Para o fator de erosividade R foi empregado um valor médio aproximado da bacia, de 731 ($\text{m}^2.\text{tonf}/\text{ha.hora}$). O fator de cobertura e manejo foi definido a partir de referências de pesquisas anteriores de valores de C para cada vegetação, baseando-se na classificação de três tipos de uso do solo indicados na Figura 7. Pelos resultados obtidos, foi considerado para o pasto o valor C de 0,017, para a agricultura (canavial) o valor C de 0,160 e, para a floresta, o valor C de 0,010.

Na falta de registros relativos ao valor C de canaviais, este foi substituído pelo valor C de plantações de trigo. O valor C para vegetação florestal foi obtido a partir de resultados de ensaios de erosão em diferentes reflorestamentos no Japão. O valor C para pastagem se refere a pastagens sob manejo conservacionista.

3. Resultado da simulação

A Figura 9 mostra o volume de erosão superficial de toda a bacia nos anos de 1962, 1972, 1984, 1993, anos em que foi efetuada a aerofotogrametria. Houve tendência do aumento do volume de erosão, em especial a partir das terras agrícolas (canaviais). O volume de erosão do solo, em 1993, foi de 120 mil toneladas aproximadamente, das quais cerca de 110 mil toneladas a partir de terras agrícolas. Para o volume de erosão do solo em pastos, foi observada a tendência de queda pela redução destas áreas. A erosão em florestas demonstrou-se pequena em todas as ocasiões. Supondo que o volume de erosão superficial estimado tenha sido originado pela erosão uniforme em toda a extensão da bacia, calculou-se a erosão em torno de 2,3mm de profundidade em 1993.

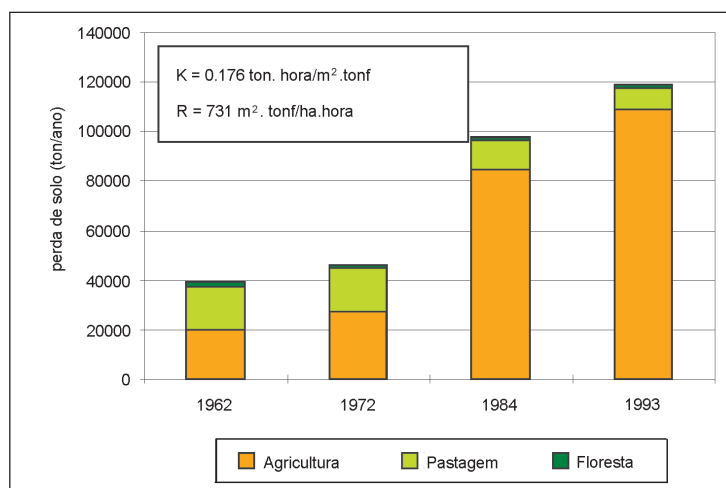


Figura 9. Variação do volume de erosão da bacia-piloto da Água da Cachoeira estimado pelo modelo de simulação.

A Figura 10 exemplifica o cálculo do volume de erosão do solo se as terras agrícolas, mais potencialmente erosíveis, fossem convertidas em florestas, baseado no mapa de uso do solo de 1993. Os resultados mostram que o volume atual de erosão do solo, de aproximadamente 120 mil toneladas, reduziria para até 17 mil toneladas. Da mesma maneira, a estimativa de redução foi calculada também para as áreas de pastagem, se convertidas em florestas; neste caso, o volume de erosão seria de 13 mil toneladas.

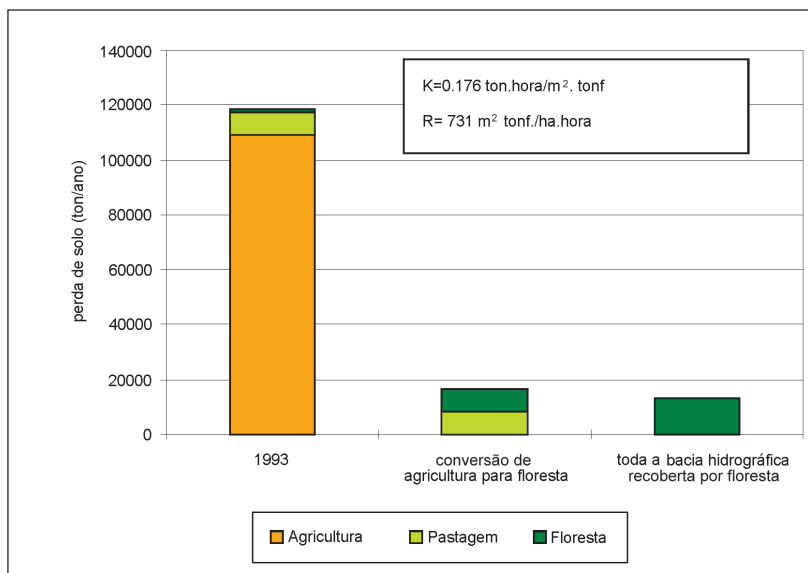


Figura 10. Estimativa do volume de erosão a partir do uso do solo em 1993, considerando os casos de conversão da terra agrícola em área florestal e de toda a bacia em floresta.

O método proposto é uma combinação da USLE com o GIS para simular o volume de erosão do solo em bacias de grandes extensões. Como forma de estimar a erosão, o método é relativamente simples. Entretanto, para aumentar a precisão do método, é importante ter em mãos valores medidos de confiabilidade para o fator de erodibilidade K e o fator de manejo e cobertura C a ser utilizados na USLE.

Para tanto, estão sendo esperados os resultados das parcelas para estudos de erosão na Floresta Estadual de Assis.

Na presente pesquisa, não foi considerado o fator de práticas de conservação P . Entretanto, nas áreas agrícolas brasileiras, é frequente a implantação de obras de terraceamento para impedir o escoamento de águas superficiais. É necessário, portanto, desenvolver, dentro da USLE, um método que avalie adequadamente os efeitos dessas obras. Os exemplos de simulação para a bacia-piloto Água da Cachoeira aqui apresentados não levaram em consideração os impactos das obras de terraceamento; portanto, há possibilidade de superestimativa dos resultados.

Paralelamente, permanece ainda pendente a questão da falta de um método para verificar a confiabilidade dos resultados da simulação. Em casos de bacias extensas em especial, não é possível medir o volume de erosão do solo que ocorre dentro da área total da bacia. Uma das soluções, considerada eficaz para esse problema, é a execução de monitoramento de sedimentos escolhendo uma bacia rela-

tivamente pequena e medir, na saída da bacia, o volume de sedimentos trazidos pelas águas e avaliar a precisão dos resultados de simulação, confrontando-os com o uso do solo dessa micro-bacia e os dados medidos de sedimentos escoados.

O modelo de simulação aqui proposto contempla apenas a erosão superficial gerada pelo escoamento de águas superficiais do solo. Entretanto, a erosão do solo que ocorre na região não é apenas superficial e estima-se que o volume de erosão proveniente de voçorocas geradas por chuvas intensas seja considerável. E ainda, avaliar por meio da USLE o volume de sedimentos provenientes de voçorocas já formadas é uma tarefa difícil. Será necessário desenvolver outros métodos adequados para o caso.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apresentamos nesse artigo o método de avaliação do volume de erosão do solo em bacias de grandes dimensões, utilizando a USLE, que é um método que avalia o volume de erosão em uma vertente ou uma parcela.

O método apresentado é considerado uma ferramenta prática para elaborar soluções para conter a erosão. As soluções poderão ser extrapoladas e aplicadas para áreas mais extensas. Os resultados das pesquisas relativas à erosão efetuadas em vertentes de pequenas proporções, tais como teste em parcelas de erosão, e o conhecimento quali-quantitativo da erosão do solo que ocorre no local, são essenciais para aplicação do método.

Conforme mencionado anteriormente, os problemas a ser resolvidos são muitos, mas, pela continuidade das pesquisas iniciadas no Projeto de Pesquisa em Conservação de Florestas e do Meio Ambiente, espera-se que esforços sejam canalizados para a solução desses problemas e que a questão da erosão do solo seja resolvida.

AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de expressar nossos profundos agradecimentos a todas as pessoas que colaboraram e se dedicaram a essa pesquisa, construindo as instalações, instalando os equipamentos, coletando dados e executando muitos outros trabalhos para viabilizar o projeto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Siviero, M. R. L. & Coiado, E. M. 2002. Sedimentos erodidos numa bacia e o que passa por uma seção de medidas a jusante. **In:** CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA SOLOS, 29. Ribeirão Preto. (Em CD-ROM).

Wischmeier, W. H. & Smith, D. D. 1978. **Predicting rainfall erosion losses – a guide to conservation planning**. Washington D.C., USDA, Agriculture Research Service. 58p. (Agriculture Handbook, 735).