

## **AVALIAÇÃO DE MODELOS COMPUTACIONAIS PARA A VERIFICAÇÃO DA EFICIÊNCIA DAS RESTRIÇÕES DO CÓDIGO FLORESTAL NA REDUÇÃO DO APORTE DE SEDIMENTOS A CURSOS D'ÁGUA**

*Fillipe Tesch<sup>1\*</sup>; Marco Aurélio Costa Caiado<sup>2</sup>*

**Resumo** – Este trabalho teve como objetivo estudar as limitações apresentadas por modelos computacionais na simulação da redução do aporte de sedimentos, a partir da implantação das restrições estabelecidas pelo Código Florestal Brasileiro em bacias hidrográficas e apontar aquele que se demonstrou ser mais recomendado para tal. Foram estudados os modelos RUSLE, WEPP e SWAT, os quais foram aplicados na bacia hidrográfica do córrego Horizonte no Distrito de Rive, Município de Alegre, Estado do Espírito Santo. O modelo RUSLE apresentou limitações quanto à simulação pretendida, destacando-se a escassez de dados de culturas agrícolas de clima tropical e até mesmo de florestas e a falta de equações para a estimativa da deposição de sedimentos. O modelo WEPP, apresentou dificuldades operacionais parecidas com o do RUSLE, quanto à representação de geometrias complexas que ocorrem no uso do solo das bacias hidrográficas, por outro lado, o modelo apresentou bom desempenho na simulação da deposição de sedimentos na simulação pretendida. Por fim, o modelo SWAT apresentou-se mais apto à simulação das restrições estabelecidas pelo Código Florestal Brasileiro, principalmente pela capacidade em calcular erosão e deposição em função da variação do uso e ocupação do solo, dividindo a bacia hidrográfica em Unidades de Reposta Hidrológica.

**Palavras-Chave** – Código Florestal Brasileiro, Erosão, Modelos Computacionais.

## **COMPUTATIONAL MODELS EVALUATION FOR VERIFICATION OF EFFICIENCY OF THE BRAZILIAN FOREST CODE APPLICATION FOR THE REDUCTION OF SEDIMENT YIELD IN WATER STREAMS**

**Abstract** – This work aimed to study the limitations presented by computer models to simulate the reduction of sediment delivery after the implementation of the restrictions established by the Brazilian Forest Code in watersheds, as well as to indicate the model that showed to be more suitable for such. The models RUSLE, WEPP and SWAT were studied through their application to the watershed of the Horizonte creek, located in the Rive District, Alegre, state of Espírito Santo. The RUSLE model presented limitations regarding the desired simulation, highlighting the lack of data of tropical crops and even forests and lack of equations for the estimation of sediment deposition. The WEPP model presented operational difficulties similar to the RUSLE, related to the representation of complex geometries that occur in land use in the watershed. On the other hand, the model performed well in simulating the deposition of sediments. Finally, the SWAT model showed more suitable for the simulation of the restrictions established by the Brazilian Forest Code, especially the ability to calculate erosion and deposition due to changes in the use and occupation of land dividing the watershed into Hydrologic Response Units.

**Keywords** – Brazilian Forest Code, Erosion, Computational Models.

<sup>1</sup> Coordenadoria de Saneamento Ambiental/IFES, Av. Vitória nº 1729, CEP 29040-780, Vitória, ES. E-mail: fillipetesch@gmail.com.

<sup>2</sup> Professor da Coordenadoria de Saneamento Ambiental/IFES, Av. Vitória nº 1729, CEP 29040-780, Vitória, ES. E-mail: mcaiado@ifes.edu.br

## INTRODUÇÃO

A aplicação das restrições impostas pelo antigo Código Florestal Brasileiro nas bacias hidrográficas encontrou muita dificuldade junto aos produtores rurais e o mesmo se espera com o novo Código (Lei nº 12.651 de 2012), já que a maioria dos agricultores as vê dissociadas da realidade do campo. Exemplo típico são as Áreas de Preservação Permanente (APP) de entorno dos corpos d'água, que acabam por ocupar parte significativa de áreas consideradas nobres na propriedade. DELALIBERA *et al* (2008) atribuem estes conflitos à falta de conceitos importantes para o planejamento territorial e conservação da natureza no Código Florestal, desde suas versões anteriores.

É incontestável a importância da preservação dos topos dos morros, áreas de altas declividades, o entorno das nascentes e cursos d'água para a redução do aporte de sedimentos aos mesmos e consequente melhoria da qualidade dos sistemas aquáticos; porém, a aplicação das mesmas restrições de forma estanque para todos os ambientes sócio-ambientais poderia ser substituída por práticas adaptadas às condições locais e que sejam, ao mesmo tempo, bem aceitas pelos proprietários.

Duas maneiras são usadas para avaliar a eficiência da aplicação de práticas na redução do aporte de poluentes aos corpos hídricos: monitoramento e modelagem. Através do monitoramento, práticas são aplicadas a determinada área e os impactos avaliados por meio da instalação de um programa de coleta e análise de amostras de água. As principais restrições ao monitoramento são os altos custos de implantação e complicações inerentes às medições, como escala de tempo, posição das estações de monitoramento e frequência de amostragem. A modelagem computacional de sistemas hídricos apresenta grandes benefícios em relação ao monitoramento e modelos como GLEAMS, AGNPS, SHE, SWAT, ANSWERS, RUSLE, WEPP, entre outros, foram desenvolvidos para simular cenários de usos do solo e prever o aporte de nutrientes e/ou sedimentos em corpos hídricos.

Segundo Yu e Rose (1999), o modelo mais utilizado no mundo para prever erosão é a Equação Universal de Perda de Solo (USLE) (Wischmeier e Smith, 1978) e sua versão revisada RUSLE (Renard *et al.*, 1997). Em anos recentes, uma nova geração de modelos baseados em processos como WEPP (Water Erosion Prediction Project) (Laflen *et al.*, 1991), EUROSEM (Morgan *et al.*, 1998), e GUEST (Misra and Rose, 1995) tem tido seu uso ampliado.

Dadas as especificidades das restrições impostas pelo Código Florestal, vê-se a necessidade de se apontar um modelo que simule adequadamente a aplicação destas restrições em nível de bacia hidrográfica.

O objetivo deste trabalho foi estudar três modelos matemáticos, SWAT – Soil and Water Assessment Tool (Arnold *et al.*, 1998); RUSLE – Revised Universal Soil Loss Equation (Renard *et al.*, 1997) e WEPP – Water Erosion Prediction Project (Laflen *et al.*, 1991) para verificar qual deles apresenta as melhores características para ser usado na verificação da efetividade das restrições impostas pelo antigo Código Florestal Brasileiro (Lei nº 4.771 de 1965) na redução do aporte de sedimentos em corpos hídricos.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Área de estudo

Foi utilizada como piloto a bacia hidrográfica do córrego Horizonte, localizada no município de Rive, Município de Alegre, estado do Espírito Santo. Esta bacia é componente da bacia hidrográfica do rio Itapemirim, na região sul do Espírito Santo (Figura 1).

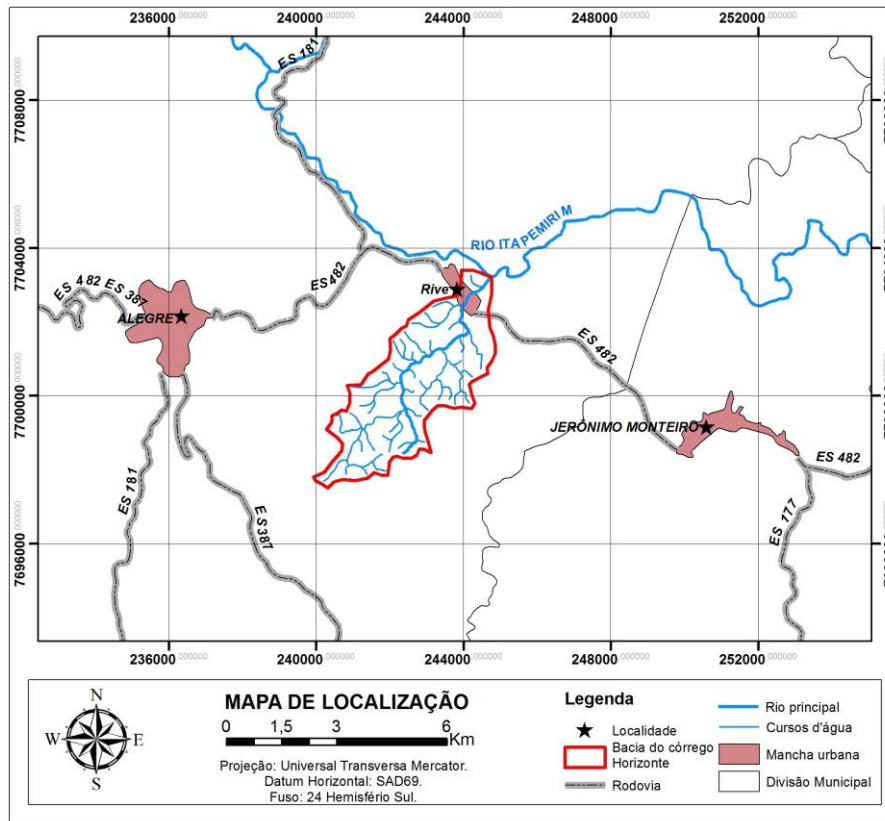


Figura 1 – Mapa de Localização da bacia hidrográfica do córrego Horizonte.

A bacia hidrográfica do córrego Horizonte está entre as cotas 120 e 620 metros, com relevo característico de montanha, com declividade média de 39%. Quanto à ocupação do solo, a bacia tem apenas 24,17% ocupados por vegetação florestal de uma área de drenagem total de 1.292,86 ha. O restante da bacia hidrográfica é ocupado, principalmente por plantações de café, milho, banana e pastagem. Neste trabalho, preocupou-se em retratar a vegetação florestal simplificando o restante dos usos do solo como uso agrícola. A Figura 2 apresenta o mapa de cobertura florestal da bacia hidrográfica do córrego Horizonte.

Segundo RADAMBRASIL (1983), o solo predominante da bacia é o Latossolo Vermelho-Amarelo sendo que a coloração do mesmo é causada pelo amplo predomínio de goethita em relação à hematita (Ker, 1997). Segundo Bertoni e Lombardi Neto (2008) o Latossolo Vermelho-Amarelo possui uma tolerância de perda de solo elevada, do ponto de vista agrícola, variando entre 9,8 a 14,2 ton/ha.

### Dados de entrada dos modelos

Os modelos estudados exigem quatro tipos de dados de entrada básicos que são utilizados para a simulação da erosão do solo: 1) clima; 2) características do solo; 3) características do uso do solo; 4) topografia e declividade.

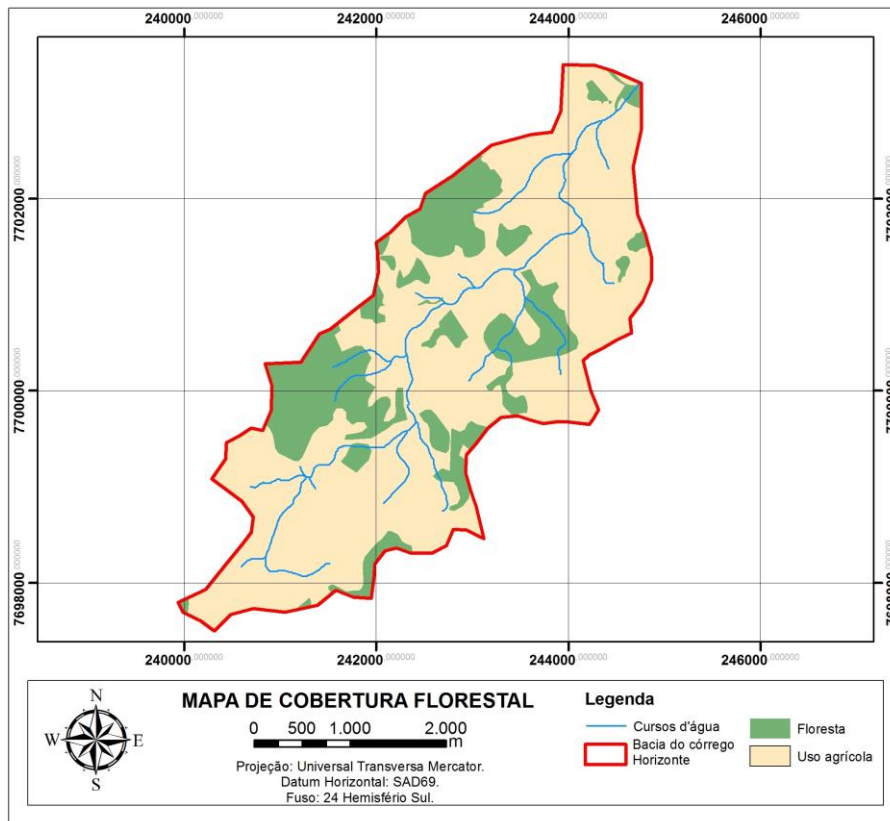


Figura 2 – Mapa de Cobertura Florestal da bacia hidrográfica do córrego Horizonte.

Pela falta de dados climáticos consistentes da região de estudo foram utilizados dados climáticos coletados em Cambuci, no Rio de Janeiro, sendo uma região com características climatológicas semelhantes à área de estudo.

As características do solo foram obtidas a partir de dados obtidos no desenvolvimento do projeto RADAMBRASIL (1983) e em pesquisas realizadas em solos semelhantes.

Os dados necessários para a caracterização do uso e ocupação do solo, por sua vez, foram obtidos na revisão bibliográfica e nas bases de dados dos próprios modelos, quando presentes. Foi gerado, ainda, o cenário de cobertura florestal após aplicação do Código Florestal à área de estudo, conforme apresentado pela Figura 3.

A topografia e a declividade, por fim, foram obtidas a partir de um modelo digital de elevação da bacia hidrográfica gerado a partir de curvas de nível com equidistância de 20 metros obtidas na carta SF-24-V-A-V-3 (IBGE, 1978) com escala de 1:50.000, que abrange a área de estudo.

### Aplicação e avaliação dos modelos

Os modelos RUSLE, WEPP e SWAT foram aplicados utilizando os dados de entrada descritos, referentes a um período de 20 anos, entre 1998 a 2018. As dificuldades inerentes à aplicação dos modelos na simulação das restrições impostas pelo Código Florestal foram analisadas no que tange à caracterização de uma bacia hidrográfica, à espacialização de suas características e das restrições impostas pelo Código Florestal, pela existência de valores *default* nos modelos que possibilitem a simulação de diferentes tipos de cobertura florestal, a racionalidade dos dados de

saída e à possibilidade de simulação da adoção das restrições impostas pelo Código Florestal em nível de bacias hidrográficas.

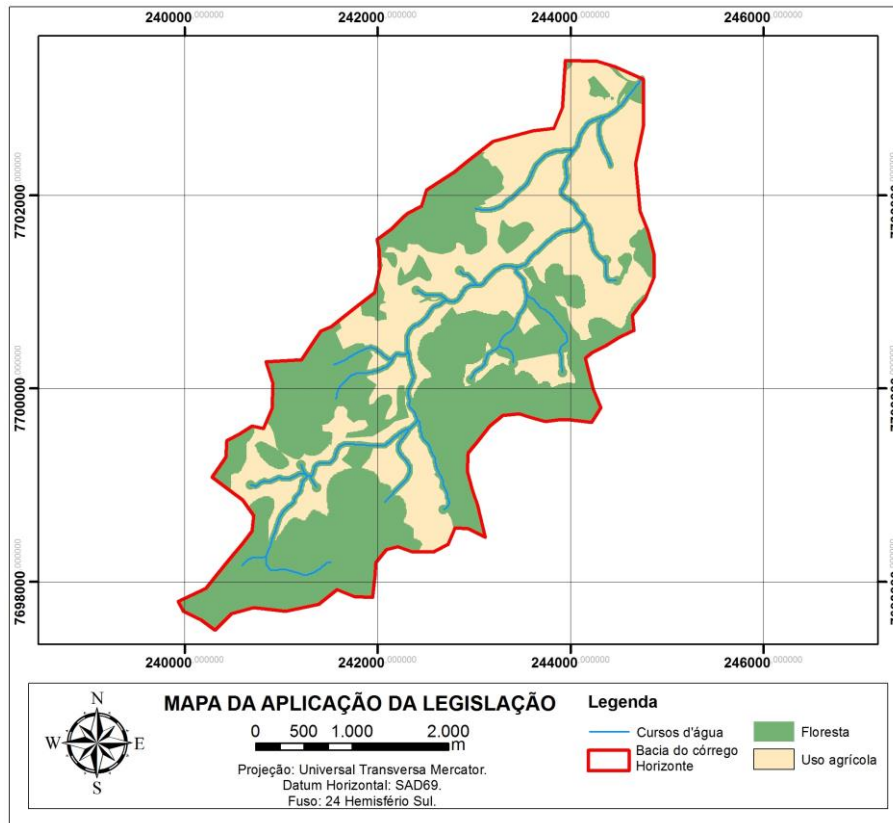


Figura 3 – Mapa de Cobertura Florestal no cenário de aplicação das restrições do Código Florestal.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)

O primeiro modelo testado foi o RUSLE, que, apesar de ser tido como um modelo confiável na simulação de práticas conservacionistas em campos agrícolas (Yu e Rose, 1999; Bertoni e Lombardi Neto, 2008), obteve resultado insatisfatório na simulação das restrições impostas pelo Código Florestal Brasileiro. A principal dificuldade operacional percebida no modelo foi relativa à representação de geometrias complexas, que variam ao longo da paisagem, já que o RUSLE simula somente encostas em duas dimensões (cota e comprimento). A concepção do modelo RUSLE, ainda, limita a apresentação dos resultados e, conseqüentemente, a avaliação da erosão do solo. Por outro lado, quando integrado a um SIG, a espacialização das informações pela bacia hidrográfica é facilitada, mas o próprio modelo ainda assume simplificações no cálculo da erosão que limitam sua utilização. Outro ponto negativo encontrado no modelo é a escassez, em seu banco de dados, de dados sobre culturas agrícolas de clima tropical como o café e a banana, além de usos importantes para a conservação do solo como florestas. Por fim, a maior limitação do modelo está na falta de equações para a estimativa do sedimento depositado ao longo da área simulada (Weill e Sparovek, 2008) que tem como impacto a subestimativa dos efeitos de matas ciliares, por exemplo, na retenção de sedimentos antes do aporte aos cursos d'água.



## Water Erosion Prediction Project (WEPP)

O modelo WEPP, assim como a RUSLE, também apresenta dificuldades na simulação de usos do solo com alta complexidade geométrica, uma vez que, originalmente, é um modelo de simulação de encostas. Existem extensões do modelo WEPP que permitem a espacialização de algumas feições em bacias hidrográficas; porém, as simplificações feitas pelo modelo causam uma perda significativa de informações, uma vez que o cálculo ainda é feito em encostas representativas da bacia hidrográfica. Por outro lado, o WEPP é um modelo com base científica significativa, ou seja, os processos que as equações representam se aproximam satisfatoriamente dos processos erosivos encontrados em campo. Como pode ser observado nas Figuras 4 e 5, o modelo simulou a deposição de sedimentos na mata ciliar localizada na posição 210 metros de uma encosta simulada. Por fim, os dados de saída são de difícil representação ao longo da bacia hidrográfica, dificultando a sua interpretação.

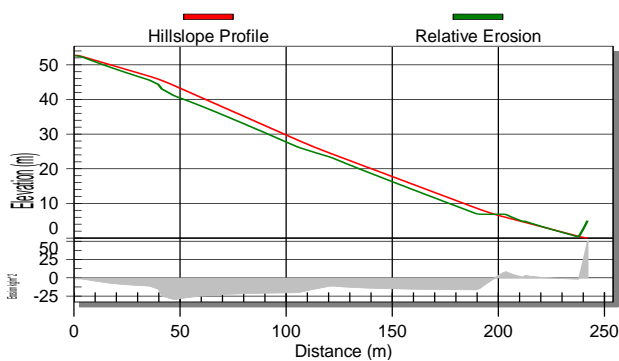


Figura 4 – Simulação de uma encosta com plantação de milho pelo WEPP.

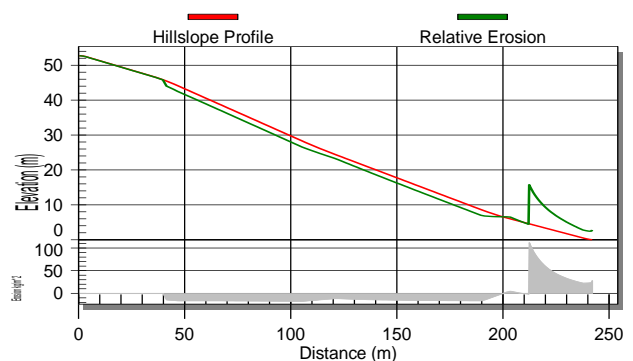


Figura 5 – Simulação de uma encosta com plantação de milho e APPs pelo WEPP.

## Soil and Water Assessment Tool (SWAT)

A maior vantagem observada no modelo SWAT foi sua associação com Sistemas de Informação Geográfica com ferramentas que auxiliam no preparo dos arquivos de entrada do modelo, principalmente no que tange à espacialização das restrições impostas pelo código florestal em uma bacia hidrográfica por meio de mapas em formato *raster*. A base de dados de vegetação do modelo é razoavelmente completa, com um arquivo para florestas tropicais, incluindo algumas culturas agrícolas tropicais, o que facilita a simulação do uso e ocupação do solo. O SWAT apresenta a opção de simulação em múltiplas unidades de resposta hidrológicas (URH). As URHs são unidades de cálculo do modelo, onde são relacionadas as equações matemáticas com os dados de entrada (clima, solo, uso do solo e topografia). A sensibilidade de reconhecimento das feições geométricas dos dados de entrada bacia pode ser regulada pelo usuário, desde o reconhecimento de cada *pixel* até os usos predominantes em cada sub-bacia.

Por outro lado, o SWAT exige uma grande quantidade de dados e informações da bacia hidrográfica para que seja possível seu uso. As equações do modelo exigem uma grande quantidade de parâmetros e coeficientes que nem sempre é possível obter em sua base de dados, necessitando de dados hidrossedimentológicos consistentes para a calibração do modelo, em um período de tempo razoável.

A espacialização dos resultados também permite uma melhor interpretação dos resultados do modelo. A Figura 6 e 7 apresenta os resultados especializados do SWAT por sub-bacia.

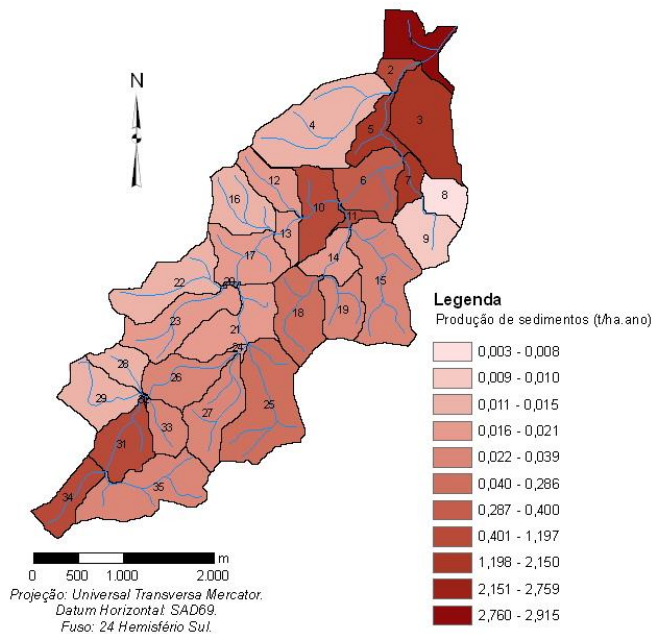


Figura 6 – Mapa da produção de sedimentos com o uso do solo atual.

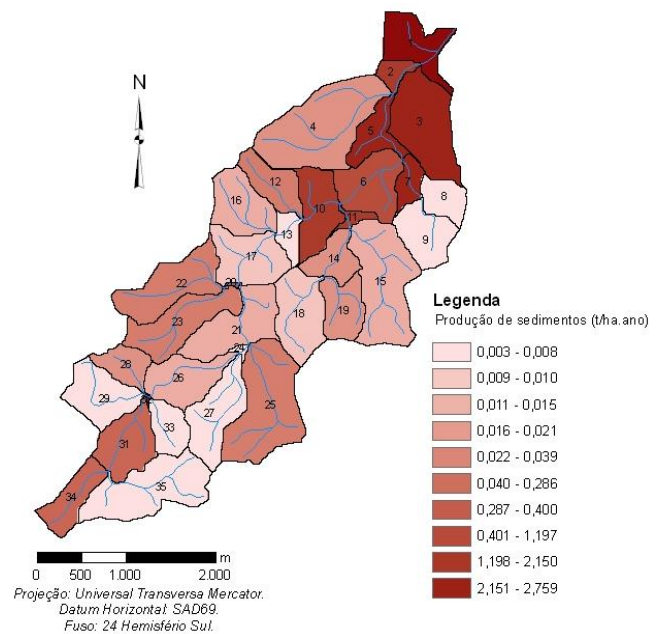


Figura 7 – Mapa da produção de sedimentos com o uso do solo após aplicação do código florestal.

## CONCLUSÃO

O RUSLE foi considerado de utilização inviável devido à impossibilidade da simulação de bacias hidrográficas a partir de encostas e, principalmente, pela falta de equações que calculem a deposição de sedimentos; porém, este modelo deve ser uma escolha a ser considerado na avaliação de práticas de conservação do solo e no manejo de culturas agrícolas em nível de propriedade rural, por se tratar de um modelo de simples operação.

O WEPP, por sua vez, apresenta boas características para a simulação de ambientes florestais, porém, sua estrutura faz com que a simulação de grandes e médias bacias hidrográficas seja operacionalmente inviável.

Por fim o modelo SWAT se apresentou como melhor opção para a verificação da eficiência da aplicação das restrições do Código Florestal Brasileiro na redução do aporte de sedimentos em bacias hidrográficas, sendo que, este possui as características necessárias para a simulação de bacias hidrográficas com usos de solo complexo capaz de classificar o uso do solo em Unidades de Resposta Hidrológica e processar várias camadas de informações espacializadas, gerando maior precisão nos resultados. Recomenda-se a inclusão de outras classes florestais na base de dados do SWAT a fim de simular florestas naturais primárias e secundárias em estágios avançado, médio e inicial de regeneração. Tal implementação poderá aumentar a precisão de estudos que envolvam as funções florestais em bacias hidrográficas.

## REFERÊNCIAS

ARNOLD, J. G.; SRINIVASAN, R.; MUTTIAH, R. S.; WILLIAMS, J. R. (1998). Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development. *Journal of American Water Resources Association*. v. 34, n. 1. 73-89p.

- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. (2008). *Conservação do Solo*. 6 ed. São Paulo: Ícone.
- DELALIBERA, E. C.; WEIRICH, P. H.; LOPES, A. R. C.; ROCHA, C. H. (2008). Alocação de reserva legal em propriedades rurais: do cartesiano ao holístico. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. v. 12, n. 3, p. 286-292, Campina Grande: UAEA/UFCG.
- IBGE (1978). *Muqui: Folha SF-24-V-A-V-3*. Escala 1:50.000. Primeira Edição.
- KER, J. C. (1997). Latossolos do Brasil: uma revisão. *GEONOMOS*. v. 5, n. 1, 17-40p.
- LAFLEN, J. M., LANE, L. J., FOSTER, G. R. (1991) . WEPP A new generation of erosion prediction technology. *Journal of Soil and Water Conservation*. n. 46, 34-38p.
- MACHADO, R. E.; VETORAZZI, C. A.; XAVIER, A. C. (2003). Simulação de cenários alternativos de uso da terra em uma microbacia utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. v. 27, 727-733p.
- MISRA, R.K, e ROSE, C.W. (1995). An examination of the relationships between erodibility parameters and soil strength. *Australian Journal of Soil Research*. n. 33, pg. 715-732.
- MORGAN, R. P. C., QUINTON, J. N., SMITH, R. E., GOVERS, G., POESEN, J. W. A., AUERSWALD, K., CHISCI G., TORRI, D., STYCZEN, M. E. (1998). The European soil erosion model (EUROSEM): A dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments. *Earth Surface Processes and Landforms*. n. 23, Vol. 6, pg 527-544.
- RADAMBRASIL (1983). *Levantamento de Recursos Naturais*. Ministério das Minas e Energia. v. 32. Rio de Janeiro.
- RENARD, K. G., FOSTER, G. A., WEESIES, G. A., MCCOOL, D. K. (1997). *Predicting Soil erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*. Washington, DC: US Government Print Office.
- WEILL, M. A. M.; SPAROVEK, G. (2008). Estudo da erosão na microbacia do Ceveiro (Piracicaba, SP). I – Estimativa das taxas de perda de solo e estudo da sensibilidade dos fatores do modelo EUPS. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. v. 32. 801-814p.
- WISCHMEIER, W. H. e SMITH, D. D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning*. USDA Agricultural Handbook No. 537. Washington, DC: US Gov. Print. Office.
- YU, B. e ROSE, C. W. (1999). Application of a physically based soil erosion model, GUEST, in the absence of data on runoff rates I. Theory and methodology. *Australian Journal of Soil Research*. n. 37, vol. 1, pg 1-11.