

**Vulnerabilidade dos Solos à Erosão:
Estimativa da Perda de Solos na Bacia
Hidrográfica do Rio Guapi-Macacu – RJ**



ISSN 1678-0892

Dezembro, 2013

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

Embrapa Solos

Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento

Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 237

Vulnerabilidade dos Solos à Erosão: Estimativa da Perda de Solos na Bacia Hidrográfica do Rio Guapi-Macacu – RJ

Dayse Thompson

Elaine Cristina Cardoso Fidalgo

Rio de Janeiro, RJ

2013

Embrapa Solos

Rua Jardim Botânico, 1024. Jardim Botânico. CEP: 22460-000
Rio de Janeiro, RJ
Fone: + 55 (21) 2179-4500
Fax: + 55 (21) 2179-5291
Home page: <https://www.embrapa.br/solos>
E-mail (sac): <https://www.embrapa.br/fale-conosco/sac/>

Comitê de Publicações da Embrapa Solos

Presidente: *Daniel Vidal Pérez*

Secretário-Executivo: *Jacqueline Silva Rezende Mattos*

Membros: *Ademar Barros da Silva, Adriana Vieira de Camargo de Moraes, Alba Leonor da Silva Martins, Claudia Regina Delaia Machado, Joyce Maria Guimarães Monteiro, Maria Regina Capdeville Laforet, Maurício Rizzato Coelho, Quitéria Sonia Cordeiro dos Santos.*

Supervisão editorial: *Jacqueline Silva Rezende Mattos*

Revisão de texto: *André Luiz da Silva Lopes*

Normalização bibliográfica: *Enyomara Lourenço Silva*

Editoração eletrônica: *Jacqueline Silva Rezende Mattos*

Foto da capa: *Elaine C. C. Fidalgo*

1ª edição

On-line (2013)

Todos os direitos reservados

A reprodução não-autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei no 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Embrapa Solos

T468v Thompson, D.

Vulnerabilidade dos solos à erosão: estimativa da perda de solos na Bacia Hidrográfica do Rio Guapi-Macacu – RJ. / Dayse Thomposon; Elaine Cristina Cardoso Fidalgo. – Rio de Janeiro, RJ: Embrapa Solos, 2015.

30 p.: il. (Embrapa Solos. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 237).
ISSN 1678-0892

1. Solo-erosão. 2. Solo-água. 3. Hidrografia. I. Thompson, Dayse. II. Fidalgo, Elaine Cristina Cardoso. III. Título. IV. Série.

CDD 631.45

© Embrapa 2013

Sumário

Resumo	5
Abstract	6
Introdução	9
Material e Métodos	11
Resultados e Discussão	22
Considerações Finais e Conclusões	27
Referências	27

Vulnerabilidade dos Solos à Erosão: Estimativa da Perda de Solos na Bacia Hidrográfica do Rio Guapi-Macacu – RJ

Dayse Thompson¹

Elaine Cristina Cardoso Fidalgo²

Resumo

Este trabalho apresenta metodologias para estimativa de perda de solos na Bacia Hidrográfica do Rio Guapi-Macacu – RJ. Para a estimativa anual de perdas de solo foi utilizada a ferramenta InVest (Integrated Valuation of Environmental Services and Tradeoffs) através do módulo que desenvolve retenção de sedimentos. Esse módulo permite calcular a perda de solo média anual de cada parcela de terra, além de determinar o quanto de solo pode chegar a um determinado ponto de interesse. Para identificar a perda potencial de solo, o modelo emprega a Equação Universal de Perda de Solo (USLE) na escala do pixel, integrando informações sobre relevo, precipitação, padrões de uso da terra e propriedades do solo. Seus resultados são dados em toneladas por sub-bacias. Os resultados obtidos neste trabalho permitiram concluir que embora haja limitações no uso da Equação Universal de Perda de Solo, o modelo possibilitou a espacialização de classes de perdas de solos com indicações de áreas consideradas mais ou menos vulneráveis aos processos erosivos, considerando os dados disponíveis e suas escalas. O uso do InVest para calcular a USLE apresentou como principal vantagem a possibilidade de integração dos dados necessários em um único ambiente, reduzindo a

¹ Geógrafa, UFRJ, bolsista da Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ.

² Engenheira agrícola, pesquisadora da Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ.

possibilidade de erros na conversão de dados. Contudo, a maior limitação encontrada a sua aplicação está na dificuldade de obtenção de dados de entrada necessários ao modelo.

Termos para indexação: vulnerabilidade; erosão dos solos; geoprocessamento; InVest.

Soil Vulnerability to Erosion: Assessment of Soil Loss in The River Guapi-Macacu Watershed

Abstract

This paper presents methodologies to estimate soil loss in the watershed of Guapi-Macacu river - RJ. The InVEST (Integrated Valuation of Environmental Services and Tradeoffs) tool was applied to estimate annual soil loss, using the sediment retention module. This module allows calculating the average annual soil loss of each parcel of land, and how much soil can reach a particular point of interest. To identify the potential soil loss, the model employs Universal Soil Loss Equation (USLE) in the pixel scale, integrating information about topography, rainfall, land use and soil properties. The results are given in tons per pixels or sub-basins. The results of this study indicate that although there are limitations in the use of USLE, the model allowed the spatialization of soil loss classes with indications of areas considered more or less vulnerable to erosion, considering the available data and their scales. The use of the InVEST to calculate the USLE showed as main advantage the possibility of integrating data in a single environment, reducing the possibility of errors of data conversion. However, the major limitation found was the difficulty of obtaining necessary input data for the model.

Index terms: Vulnerability; Soil erosion; GIS; InVest.

Introdução

Em todo o mundo, verificam-se inúmeros cenários de degradação das paisagens, decorrentes de fenômenos naturais e, também, decorrentes de usos e ocupações desordenadas, trazendo prejuízos não só ao meio físico natural, como ao próprio homem.

Dentre as formas de degradação, tem-se a perda de solo por erosão, que pode causar grandes alterações na paisagem, além de prejuízos econômicos e, em casos extremos, causar desastres e perdas de vidas. Nesse contexto, busca-se evitar, por meio da legislação ambiental, que áreas potenciais de risco se transformem em áreas de risco efetivo (MAFFRA; MAZZOLA, 2007).

No Brasil, um dos fatores de desgastes e perdas de solos que mais seriamente tem contribuído para a improdutividade desses solos é a erosão hídrica, facilitada e acelerada pelo homem com suas práticas inadequadas de agricultura (BERTONI; LOMBARDI NETO, 1985). Contudo, há de se ressaltar que não apenas as práticas ligadas à agricultura são as que contribuem para a aceleração da erosão dos solos, outras formas de uso e ocupação, feitas sem planejamento, também podem contribuir de forma significativa para a aceleração da degradação dos solos.

Dentre outras formas de erosão podem ser destacadas a erosão eólica, muito atuante em regiões costeiras ou mesmo em outras regiões cujos ventos sejam fortes e constantes; a erosão fluvial, que está associada ao trabalho dos rios; a erosão marinha associada ao processo contínuo de ação das ondas ao longo de ambientes litorâneos; a erosão glacial associada à movimentação de geleiras, que não ocorre no território brasileiro; a erosão denominada de erosão natural ou geológica, a qual se constitui de um processo essencial para a formação do relevo da superfície terrestre, para formação de solos aluviais e de rochas sedimentares; e a erosão antrópica ou acelerada do solo, que designa a ativação e aceleração dos processos erosivos naturais, como resultado de interferências humanas (WEILL; PIRES NETO, 2007).

De acordo com dados obtidos pela Pesquisa de Informações Básicas Municipi-

país – MUNIC, realizada pelo IBGE em 2002 e publicada em 2005, revelou-se que, dentre os municípios brasileiros que declararam já terem sofrido com algum tipo de alteração ambiental nos 24 meses anteriores à pesquisa, cerca de 16% sofreram com problemas relacionados a deslizamentos de encostas e 19% com inundações. Os dados mostraram que cerca de 25% daqueles que sofreram com deslizamentos de terras associaram esse fenômeno à degradação de áreas protegidas e à ocupação irregular de áreas fragilizadas, e outros 34% atribuíram este efeito ao desmatamento. Em síntese, o uso impróprio dos recursos naturais, a ocupação irregular de terras com maior susceptibilidade natural à erosão e o desmatamento são, no Brasil, os principais potencializadores da ocorrência de desastres naturais. Mas não somente no Brasil os estudos sobre desastres e riscos são relacionados a problemas ambientais. A comunidade internacional tem considerado e buscado fundamentar seus estudos, também, sobre esta perspectiva (MAFFRA; MAZZOLA, 2007).

Dados apresentados por Lal (1990, citado por WEILL; PIRES NETO, 2007) demonstraram que a erosão acelerada dos solos já havia destruído irreversivelmente até então algo em torno de 430 milhões de hectares de terras em diferentes países. Trabalho apresentado por El-Swaify (LAFLEN; ROOSE, 1998, citado por WEILL; PIRES NETO, 2007) indica que a erosão hídrica contribuiu com aproximadamente 55% dos quase dois bilhões de hectares de solos degradados no mundo. No Brasil, dados estimados por Marques no final da década de 1940 indicavam que as perdas anuais de solos, por erosão hídrica do tipo laminar, aproximavam-se de 500 milhões de toneladas. Dados mais recentes (CASTRO, 1991, citado por WEILL; PIRES NETO, 2007) indicam que somente no Estado de São Paulo se perde cerca de 200 milhões de toneladas de solo anualmente.

Dentre os principais fatores que influenciam os processos erosivos estão: a erosividade da precipitação, medida principalmente pela sua intensidade; a erodibilidade, definida pelas características físicas e químicas do solo; a cobertura vegetal, pela sua maior ou menor proteção do solo, a declividade e comprimentos das encostas; e as práticas de conservação e manejo dos solos existentes (ALVARES; PIMENTA, 1998).

A declividade e o comprimento de rampa são variáveis importantes para estudos de vulnerabilidade dos solos. De acordo com Morgan (2005), a perda de solos tende a aumentar com o aumento da declividade e do comprimento de rampa das vertentes como resultado do aumento da velocidade e do volume do escoamento de água na superfície. Desta forma, a elaboração de mapas de declividade e comprimento de rampa têm grande importância para estudos da vulnerabilidade das terras, particularmente os estudos sobre a vulnerabilidade das terras aos processos erosivos.

Neste contexto, o presente trabalho foi desenvolvido tendo como objetivo analisar os fatores que influem na vulnerabilidade a erosão dos solos e suas variações ao longo da Bacia Hidrográfica do Rio Guapi-Macacu (BHRGM), no Estado do Rio de Janeiro. Como objetivo específico, tem-se analisar o efeito dos fatores da Equação Universal de Perdas de Solos (USLE), utilizando o módulo que desenvolve o modelo de retenção de sedimentos do InVest.

O trabalho foi desenvolvido no âmbito do projeto “As transformações na paisagem da Bacia Hidrográfica do Rio Guapi-Macacu, RJ e sua relação com a vulnerabilidade das terras”, realizado com recursos da FAPERJ e liderado pela Embrapa Solos. O trabalho também é parte da monografia apresentada por Dayse Thompson como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Bacharel em Geografia, ao Departamento de Geografia da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ.

Material e Métodos

Área de Estudo

A Bacia Hidrográfica do Rio Guapi-Macacu (BHRGM) é uma bacia que abrange grande parte da área de drenagem da Baía de Guanabara com aproximadamente 1.256 km², compreendida entre as latitudes médias de 22° 24' e 22° 57'S e longitudes médias 42° 33'e 43° 19'W, abrangendo os municípios de Cachoeira de Macacu e parte dos municípios de Itaboraí e Guapimirim, situados na porção leste da baía, no Estado do Rio de Janeiro (PEDREIRA et al., 2009) (Figura 1). Ela é caracterizada por um relevo muito diversificado indo de áreas planas, no nível do mar, até regiões serranas, com declividades acentuadas e altitudes que ultrapassam os 2.000 metros (FIDALGO et al., 2009).

O clima regional é classificado como tropical úmido, com estação seca pouco pronunciada, com temperatura máxima de 35°C e mínima de 13°C, sendo a média superior a 18°C em todos os meses. As maiores temperaturas, acima de 25°C, ocorrem nas áreas abaixo de 200 metros de altitude, englobando a Baixada Fluminense. Nas áreas mais elevadas, as temperaturas atingem índices entre 20°C e 18°C. As temperaturas menores, durante o mês de julho, tendem para índices médios inferiores a 13°C nas áreas situadas acima de 1.000 metros, enquanto que, na Baixada, a temperatura média oscila entre 19°C e 20°C. Nesta área, o inverno é ameno e o verão climático é sempre quente e muito longo, de setembro a março, embora a temperatura máxima se verifique, normalmente, em dezembro ou janeiro (PEDREIRA et al., 2009). Complementarmente, Amador (1997) descreve que o clima na região é quente e chuvoso, tipicamente tropical, com médias de chuvas anuais entre 1.200 e 1.600 mm (AMADOR, 1997), sendo do tipo AW, de acordo com a classificação de Koppén. Os meses do verão (dezembro, janeiro e fevereiro) são bastante úmidos com pluviosidade de até 350 mm. Entretanto, no período seco de inverno este padrão se reverte, quando as pluviosidades não ultrapassam 90 mm por mês. Observa-se ainda que a pluviosidade se intensifica em direção à Serra do Mar, onde os valores são bastante elevados.

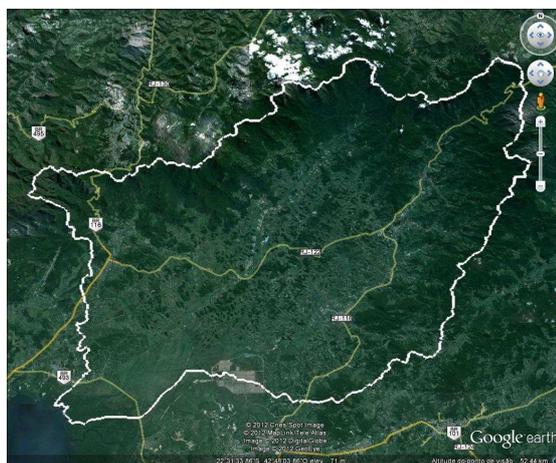


Figura 1. Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Guapi-Macacu, RJ.

A BHRGM possui áreas de Mata Atlântica ainda preservadas (Figura 2) e isso se deve, principalmente à configuração do relevo, onde boa parte dos fragmentos de vegetação encontram-se restritos a áreas de difícil acesso, portanto em algumas porções da paisagem. Devido a isso, a vegetação remanescente torna-se representativa de um número limitado de habitats, o que pode ser restritivo para a conservação da biodiversidade (THOMPSON et al., 2011).

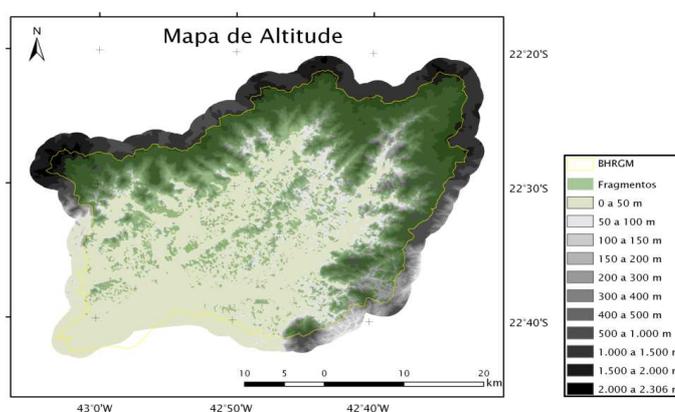


Figura 2. Fragmentos da Mata Atlântica e diferentes faixas altitudinais na BHRGM.

A área está inserida no que foi denominado por Silveira (1964, citado por COUTINHO, 2000) de litoral das escarpas cristalinas, que se estende do norte do Estado do Rio de Janeiro até ao Cabo de Santa Marta (SC). O embasamento cristalino (escarpa de falha) nesta área recua em relação ao mar desenvolvendo planícies costeiras de pequeno porte. Esta planície é interdigitada por colúvios que recobrem regolitos das colinas esculpidas em rochas do embasamento cristalino, tabuleiros desenvolvidos nos depósitos da Formação Macacu (MEIS; AMADOR, 1972, 1974, 1977; AMADOR, 1997, citados por COUTINHO, 2000).

Com relação à sua ocupação, este cenário vem sofrendo intervenções humanas de magnitude crescente. O início extrativista foi seguido do ciclo da cana-de-açúcar (séc. XVII), do ciclo do café e mineração (séc. XVIII), expansão urbana com o modelo agrário exportador (1870- 1930), urbano industrial (1930-1990) até o atual período de economia globalizada.

Segundo Cabral (2007 citado por BENAVIDES et al., 2009), a ocupação do atual Município de Cachoeiras de Macacu, o mais expressivo entre as bacias do Macacu e Caceribu, parece ter tido uma ocupação diferenciada das demais, tendo sido desde o século XVI uma região predominantemente voltada para o cultivo de gêneros alimentícios e não para a agroindústria do açúcar.

No Século XIX, conforme destacado por Machado (1997, citado por BENAVIDES et al., 2009), os desmatamentos dos altos vales da Bacia Hidrográfica do Macacu-Caceribu, em função do cultivo do café, geraram prejuízos, principalmente, na porção à jusante da bacia por ocasião das inundações, como aumento no aporte e acúmulo de sedimentos transportados, em especial para a foz do Macacu. Nesse contexto, surgiram as primeiras obras de engenharia para reduzir os efeitos provocados pelas inundações.

Contudo, a partir do século XX, viu-se surgir um longo processo de ocupação urbana na área da bacia, favorecido pela construção de ferrovias já no século XIX, promovendo mudanças na distribuição populacional. Contudo, seria a malha rodoviária a grande responsável pela configuração urbana da região (BENAVIDES et al., 2009).

É importante ressaltar que nesta bacia se insere parte do atual Complexo Petroquímico da Petrobras (COMPERJ). Uma das grandes preocupações com a chegada do COMPERJ refere-se à expansão urbana desordenada e à intensificação da especulação imobiliária, o que pode agravar os problemas de infraestrutura já existentes. A Petrobras estima que o projeto gere cerca de 210 mil empregos diretos e indiretos e são esperadas mudanças significativas nas dinâmicas social, econômica e ambiental na região, que se refletirão tanto na demanda quanto na oferta de recursos hídricos, em especial nos municípios de Itaboraí, São Gonçalo e Tanguá, e provavelmente será acentuada a tendência de aumento do grau de conurbação ao longo das estradas, abrangendo também os municípios de Cachoeiras de Macacu (em especial no distrito de Papucaia) e Rio Bonito (COMPERJ ..., 2008).

O empreendimento terá grande potencial de atração de empresas chamadas de “terceira geração petroquímica”, que abrangem indústrias consumidoras

dos insumos produzidos pelas indústrias de primeira e segunda geração, além de indústrias consumidoras intermediárias de produtos de material plástico. Também serão atraídas empresas que prestam atividades de apoio ao conjunto de indústrias instaladas, e espera-se um crescimento das atividades na área de serviços em função do aumento da renda em salários, lucros, impostos e outros (COMPERJ ..., 2008).

Há receio de que esses setores ampliem os problemas de deficiência no abastecimento de água devido ao aumento da demanda residencial urbana e das indústrias a serem instaladas, além de que aumentem os problemas de contaminação das águas pela ampliação do volume de esgotos sanitários e de efluentes industriais. Espera-se também que ocorra expansão urbana de forma desordenada, intensificação da especulação e pressão imobiliária, gerando aumento da pressão sobre áreas de agricultura e de florestas remanescentes nos municípios das bacias dos rios Guapi-Macacu e Caceribu, conforme destacou Pedreira et al. (2010).

Nesse contexto, uma análise promovida na escala da bacia poderá promover subsídios para gestão e planejamento da mesma. Reforçando-se, assim, a escolha deste recorte espacial como base para análise da vulnerabilidade à erosão dos solos.

Estimativa da Perda de Solos

A estimativa da perda de solos foi realizada utilizando a ferramenta InVEST (Integrated Valuation of Environmental Services and Tradeoffs), que é um programa livremente disponível, de código aberto e funciona em ambiente ArcGIS (toolbox).

O InVEST (TALLIS et al., 2012) apresenta um conjunto de modelos desenvolvidos pelo Projeto Capital Natural (<http://www.naturalcapitalproject.org>), como subsídio ao processo de tomada de decisão ambiental. Os modelos permitem a quantificação, espacialização e valoração dos benefícios providos pelos sistemas terrestre, marinho e de água doce.

Para a estimativa de perdas de solos anual, foi utilizado o módulo que desen-

volve o modelo de retenção de sedimentos. Esse módulo permite calcular a perda de solo média anual de cada parcela de terra, além de determinar o quanto de solo pode chegar a um determinado ponto de interesse, conhecendo a capacidade de cada parcela para reter sedimentos, e, adicionalmente, avaliar o custo de remoção do sedimento acumulado.

Face aos objetivos deste trabalho e aos dados disponíveis, o InVEST foi aplicado somente para o cálculo das perdas de solo anuais. Para identificar a perda potencial de solo, o modelo emprega a Equação Universal de Perda de Solo (USLE) (WISCHMEIER; SMITH, 1978) na escala de pixel, que integra informações sobre padrões de uso da terra e propriedades do solo, bem como informações sobre relevo e precipitação. Embora possam ser acessados os resultados da aplicação da USLE em cada pixel, o programa apresenta como produto final os resultados totalizados por sub-bacias, o que pode ser mais adequado aos processos de tomada de decisão.

Os dados de entrada necessários para o modelo são (Figura 3):

- dados espacializados de:
 - erosividade (R);
 - erodibilidade (K);
 - modelo de elevação digital (para extração do fator LS); e
 - uso e cobertura da terra;
- dados numéricos referentes a:
 - fator de uso da terra para cada classe de uso (C);
 - fator manejo do solo (P);
 - limiar de declividade; e
 - limiar de acúmulo de fluxo.

Os dados de saída são relativos à erosão média anual em toneladas por pixel por ano.

O programa exige que os dados estejam no formato raster, com mesma resolução e mesmo sistema de projeção. No caso, os dados especializados em formato raster apresentavam resolução de 30 metros e sistema de projeção UTM, Datum Córrego Alegre, Fuso 23 Sul. O sistema de projeção utilizado é o mesmo das cartas do IBGE disponíveis para a área de estudo, em escala 1:50.000, que foi a referência para o georreferenciamento dos dados disponíveis (FIDALGO et al., 2009; PEDREIRA et al., 2009).

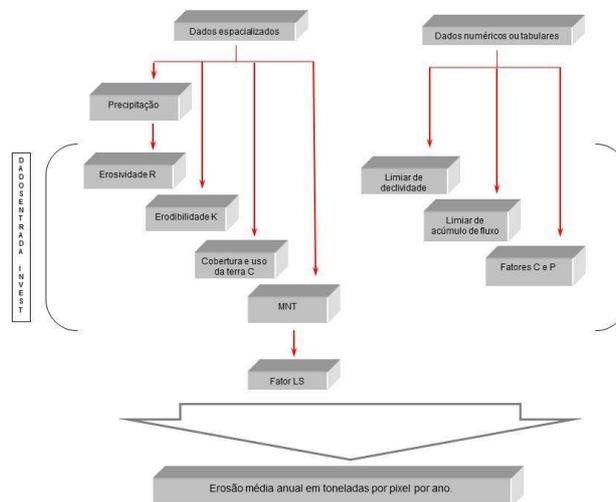


Figura 03. Esquema metodológico do modelo InVest.

Os dados de erosividade foram estimados a partir dos dados disponíveis das estações meteorológicas da área de estudo. O método para sua estimativa e espacialização dos resultados são apresentados por Fidalgo et al. (2012).

O mapa de erodibilidade, ainda não publicado, foi gentilmente cedido pelo Dr. César da Silva Chagas. Ele é derivado do levantamento de solos realizado na área de estudo e do mapa resultante, elaborado na escala 1:50.000. Os valores de erodibilidade da região foram atribuídos a cada unidade de mapeamento de solo e variam entre 0 e 0,031 $\text{Mg.h.MJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}$ (Figura 4).

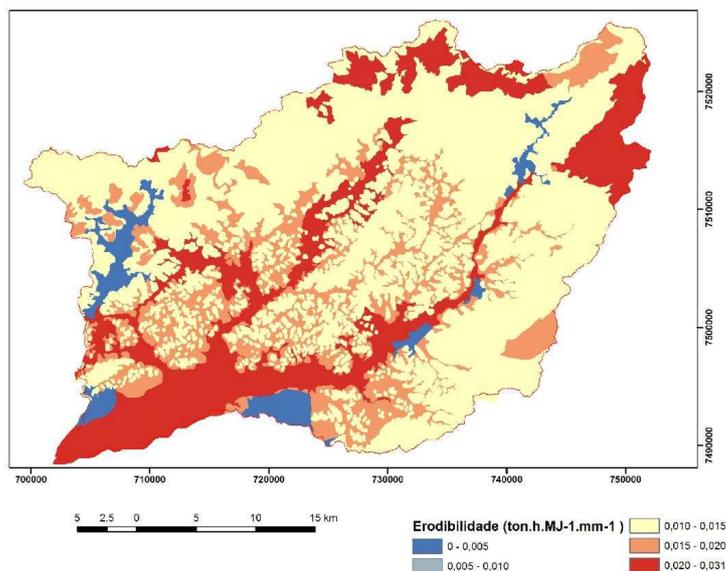


Figura 04. Erodibilidade dos solos na Bacia Hidrográfica do Rio Guapi-Macacu.

Fonte: cedido pelo Dr. César da Silva Chagas.

O fator topográfico foi obtido a partir do modelo digital de elevação com resolução de 30 metros, disponível para a área (FIDALGO et al., 2009). Considerações sobre a metodologia para a estimativa do fator LS disponível no InVEST, bem como limiar de declividade utilizado, são apresentados no próximo item.

O acúmulo de fluxo corresponde ao valor acumulado de fluxo das células à montante. Seu limiar é escolhido da forma que, ao ser ultrapassado, as células que apresentarem valor acima deste são consideradas como parte de um curso d'água.

Para a escolha desse limiar, foram realizados testes em que foram comparados resultados de diferentes valores de fluxo acumulado e a rede de cursos d'água representada nas cartas em escala 1:50.00 e utilizadas para a representação planialtimétrica da área. Com base nesses testes, selecionou-se o valor de fluxo acumulado igual a 300.

Uso do modelo de elevação digital para estimativa do Fator Topográfico (LS)

O InVEST calcula o fator topográfico diretamente a partir do modelo digital de elevação (MDE). Neste caso foi utilizado o MDE elaborado por Fidalgo et al. (2009) em formato raster e com resolução de 30 metros. Esse MDE, atendendo os requisitos do modelo, foi corrigido de forma a eliminar depressões espúrias, sendo hidrologicamente consistente.

As estimativas de comprimento de rampa no InVEST são baseadas em uma metodologia disponível em um modelo chamado N-SPECT, no qual mudanças bruscas da declividade resultam em corte no comprimento de rampa. No modelo, diferentes equações LS são automaticamente usadas para as condições de declividade “encostas baixas” e “encostas altas”.

Para baixas declividades:

$$LS = \left(\frac{flowacc \cdot cellsize}{22.13} \right)^{mn} \left(\left(\frac{\sin(slope \cdot 0.01745)}{0.09} \right)^{1.4} \right) * 1.6$$

$$mn = \begin{cases} 0.5, & slope \geq 5\% \\ 0.4, & 3.5 < slope < 5\% \\ 0.3, & 1 < slope \leq 3.5\% \\ 0.2, & slope \leq 1\% \end{cases}$$

onde *flowacc* é o fluxo acumulado em cada pixel e *cellsize* é o tamanho do pixel.

Para altas declividades:

$$LS = 0.08 \lambda^{0.35} prct_slope^{0.6}$$

$$\lambda = \begin{cases} cellsize, & flowdir = 1, 4, 16, \text{ or } 64 \\ 1.4 \cdot cellsize, & other\ flowdir \end{cases}$$

onde *prct_slope* é a declividade em porcentagem do pixel e *flowdir* é a direção do fluxo no pixel.

O limiar de declividade para alternar entre as duas equações deve ser definido pelo usuário e depende da geomorfologia local e das características das bacias hidrográficas. No caso da Bacia Hidrográfica do Rio Guapi-Macacu, optou-se por utilizar o limiar sugerido pelo programa, igual a 75%.

Determinação dos Fatores Uso (C) e Manejo do Solo (P)

O fator C foi obtido com base no mapa de uso e cobertura da terra (Figura 5) elaborado com imagens do sensor TM-Landsat 5 de 02/08/2007 (PEDREIRA et al., 2009).

Segundo Costa et al. (2005), os valores atribuídos às classes de uso e cobertura do solo descritos na Tabela 1 e utilizados em seu trabalho realizado em 2005 para estimativas de perdas de solos em microbacias hidrográficas para o Estado do Rio de Janeiro, foram feitos com base no mapeamento realizado no ano 2000 pela Fundação CIDE.

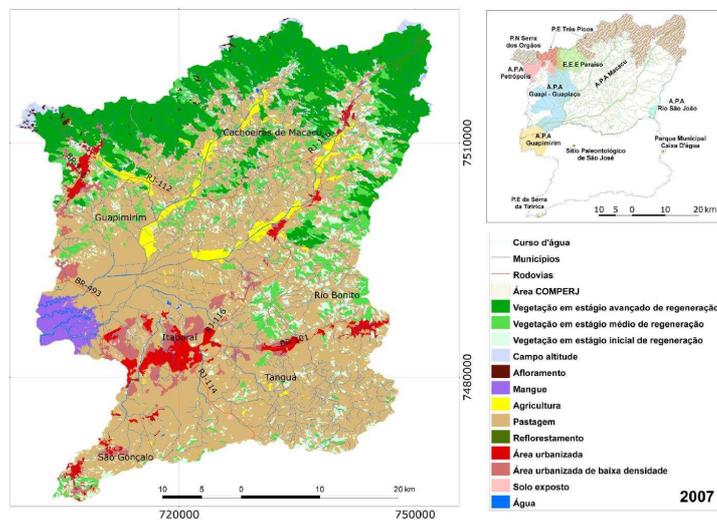


Figura 05. Ilustração do mapa de uso e cobertura da terra das Bacias Hidrográficas dos rios Guapi-Macacu e Caceribu, de 2007.

Fonte: Pedreira et al., (2009)

Tabela 1. Valores atribuídos as classes de Uso e Cobertura do Solo.

Classes	Fator C segundo levantamento realizado por Costa et al. (2005)
Afloramento rochoso	0,01
Água	0
Área Agrícola	0,2558821
Área Urbanizada	0,0075
Área Urbanizada de Baixa Densidade	0,01
Campo de Altitude	0,0194
Mangue	0,005
Pastagem	0,0288
Solo Exposto	1
Vegetação em estágio inicial de regeneração	0,0007
Vegetação em estágio médio de regeneração	0,0001
Vegetação em estágio avançado de regeneração	0,0001

Em trabalho realizado por Pedreira et al. (2009), a área de mangue existente na área de estudo encontra-se na foz do Rio Macacu, na Baía de Guanabara. As áreas de produção agrícola observadas e ocupadas de forma sazonal ou permanente referem-se, em especial, a cultivos de hortaliças como inhame, jiló, quiabo, tomate, feijão, milho, mandioca, cana-de-açúcar e frutíferas como maracujá, banana, coco, goiaba e citros. Destacando que as áreas com cultivo de coco assemelham-se ao padrão de pastagem e por vezes de solo exposto, devido à baixa densidade de plantio. Já com relação às áreas de Pastagem, observou-se que estas áreas possuem vegetação do tipo herbácea rasteira, com diferentes tipos de manejo. Em observação, as áreas urbanas são caracterizadas pela concentração de núcleos populacionais, sendo a principal concentração urbana encontrada na Bacia do Rio Macacu, a sede do Município de Cachoeiras de Macacu, embora outras áreas urbanizadas também se inserem na área da bacia, como as dos municípios de Guapimirim e Itaboraí. Com relação à classe de solo exposto, observou-se que essas áreas estão ocupadas por atividades como agricultura, mineração, áreas sob processos erosivos, dentre outros. A classe de afloramento rochoso foi determinada neste trabalho como sendo áreas com predominância de rochas expostas e com ausência ou baixa densidade de vegetação. Por fim, com relação às classes de vegetação identificadas pelos autores, seguiu-se o estabelecido na legislação em vigor.

Resultados e Discussões

Os resultados da estimativa da perda de solos obtidos pela aplicação do módulo de retenção de sedimentos da ferramenta InVEST (Integrated Valuation of Environmental Services and Tradeoffs) são apresentados na Figura 6. A estimativa de perda de solos apresentada pelo InVEST refere-se à perda de solo média anual de cada parcela de terra, neste caso, a perda de solo por área do pixel (30 x 30 metros). Na Figura apresentada, os valores foram transformados para perda de solos em toneladas por hectare e definidas cinco classes.

Os limites das classes de perda de solo basearam-se no estudo de Costa et al. (2005) que, por sua vez, baseou-se em outros resultados encontrados na literatura. Ao estimar as perdas de solos para o Estado do Rio de Janeiro, Costa et al. (2005) observaram que cerca de 21% das microbacias hidrográficas apresentam perdas muito baixas, com valores menores que 10 ton/ha.ano e 16% das MBH tem perdas baixas, com valores entre 10 e 20 ton/ha.ano; 43% das MBH apresentam perdas de solos médias, com valores entre 20 e 50 ton/ha.ano; 19% mostram valores altos, entre 50 e 100 ton/ha.ano; e menos de 1% apresentam perdas muito altas, entre 100 e 131 ton/ha.ano.

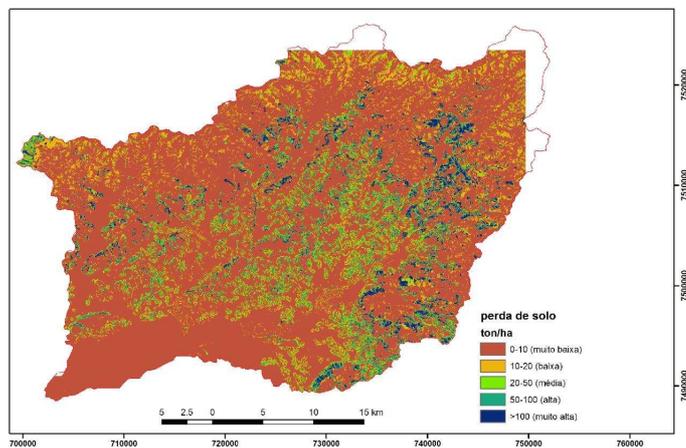


Figura 6. Estimativa de perda de solos em ton.ha⁻¹ na Bacia Hidrográfica do Rio Guapi-Macacu, como resultado da aplicação da Equação Universal de Perda de Solos.

Observa-se na Figura 6 que as classes muito baixa, baixa, média, alta e muito alta de perda de solo se encontram distribuídas pela bacia, porém as classes média, alta e muito alta perda de solo se encontram mais concentradas em algumas posições.

As estimativas de perda de solo por erosão resultantes da aplicação da Equação Universal de Perda de Solo (USLE) devem ser utilizadas com bastante precaução, ao se considerar as críticas existentes ao modelo (TALLIS et al., 2012). A primeira delas é que esse modelo simula apenas a erosão laminar e, em algumas áreas, outros processos podem ser mais importantes e determinantes para a perda de solos. Além disso, as estimativas do modelo são anuais, não permitindo a análise da variação sazonal e de eventos extremos. Soma-se a isso a dificuldade em encontrar uma boa base de dados e resultados de pesquisa para a atribuição de valores para os fatores: uso e cobertura da terra (C) e práticas de manejo (P).

De acordo com Araújo (2006), Wischmeier e Smith (1978) previnem o usuário (da USLE) que a grande fonte potencial de erros está na seleção de valores inadequados dos fatores e que as condições a serem avaliadas devem ser claramente definidas, mas muitos pesquisadores investigaram o uso da USLE em áreas de vegetação natural. A maioria destes estudos mostrou que a USLE não tem desempenho tão bom como quando testado em condições de cultivo agrícola. Apesar destes estudos não apresentarem os mesmos resultados, eles realmente indicam que versões não modificadas da USLE não estimam adequadamente a erosão em solos não-agrícolas. Entretanto, segundo Ranieri et al. (1998, citados por ARAÚJO, 2006), apesar dos limites e restrições atribuídos à USLE, esta continua sendo o principal modelo aplicado em estudos de erosão de microbacias por geoprocessamento. Neste estudo, a grande vantagem da aplicação da USLE está na indicação dos locais mais vulneráveis à perda de solos. Para uma melhor compreensão dos fatores da USLE e como eles influenciaram a composição de cada classe de perda de solo definida, é analisada a seguir a distribuição de cada fator que compõe o modelo (K, R, LS, C e P) em cada classe de perda de solo.

Ao analisarmos a erosividade em cada classe de perda de solo (Tabela 2), se

observa que os valores têm grande variação em todas as classes de perda de solo e as médias são próximas. Esses resultados indicam que a erosividade não foi um fator determinante na definição das classes de perda de solo na bacia.

Tabela 2. Estatísticas de erosividade por classe de perda de solo e área de cada classe.

Classe de perda de solo	Área total (km ²)	Erosividade E _{iso} (MJ.mm.ha ⁻¹ .h ⁻¹ .mês ⁻¹)				
		Mínimo	Máximo	Amplitude	Média	Desvio padrão
muito baixa	929,89	5575,59	15895,50	10319,90	9809,99	1709,78
baixa	98,40	5717,56	15896,30	10178,80	10542,60	1839,44
média	90,95	5718,18	15896,40	10178,20	9722,77	1451,13
alta	56,47	5718,84	15896,70	10177,80	9729,14	1181,21
muito alta	41,38	5727,84	15895,40	10167,50	9985,07	1162,27

Ao analisar a erodibilidade em cada classe de perda de solo (Tabela 3), observa-se que somente a classe de perda de solo muito baixa apresentou valores abaixo de 0,010 ton.h.MJ⁻¹.mm⁻¹. Porém a amplitude dessa classe e o desvio padrão foram maiores que das demais e o valor médio de erodibilidade, contraditoriamente, foi superior. Da mesma forma como observamos para a erosividade, os resultados indicam que a erodibilidade não foi um fator determinante na definição das classes de perda de solo na bacia.

Tabela 3. Estatísticas de erodibilidade por classe de perda de solo.

Classe de perda de solo	Erodibilidade (ton.h.MJ ⁻¹ .mm ⁻¹)				
	Mínimo	Máximo	Amplitude	Média	Desvio padrão
muito baixa	0,000	0,031	0,031	0,016	0,006
baixa	0,010	0,031	0,020	0,016	0,005
média	0,010	0,031	0,020	0,015	0,005
alta	0,010	0,031	0,020	0,014	0,003
muito alta	0,010	0,031	0,020	0,014	0,003

A distribuição da estimativa do fator LS na bacia é apresentada na Figura 7. Variando entre 0 e 429,979, o fator LS apresenta valores mais elevados nas áreas de relevo mais acidentado na bacia, como esperado.

A análise da distribuição desse fator em cada classe de perda de solo (Tabela 4) revela que as classes de perda de solo muito baixa e baixa apresentaram fator LS com valores máximos abaixo das demais classes. E a classe de perda de solo muito baixa, adicionalmente, apresentou o menor valor médio para o fator. Esses resultados indicam que esse fator foi determinante na definição da classe de perda de solo muito baixa e, em menor grau, na classe baixa.

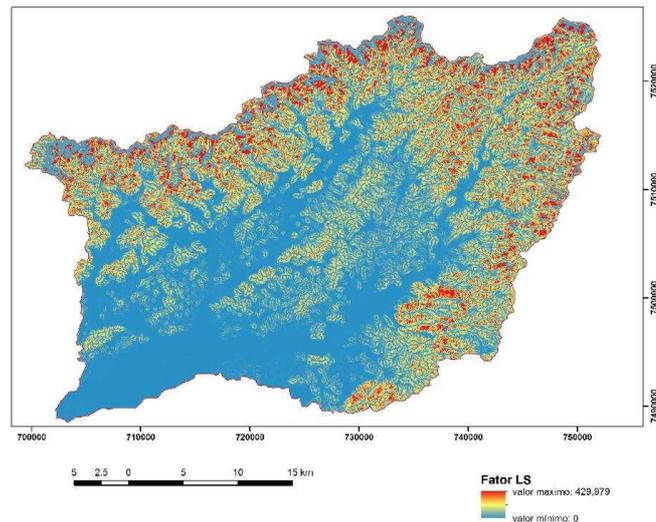


Figura 7. Distribuição da estimativa do Fator LS.

Ao analisar a distribuição das classes de uso da terra em cada classe de perda de solo (Tabela 5), observa-se que a pastagem predomina em todas as classes de perda de solo, exceto na classe baixa perda de solo. Porém, nas classes média, alta e muito alta de perda de solo, a pastagem ocupa mais de 70% da área, mostrando a influência desse uso da terra na configuração dessas classes. Por outro lado, as classes de vegetação têm maior participação nas áreas de perda de solo muito baixa a baixa, principalmente a vegetação em estágio avançado de regeneração. Esses resultados mostram a grande influência do uso da terra na estimativa da perda de solos através da USLE.

Tabela 4. Estatísticas do fator LS por classe de perda de solo.

Fator LS					
classe de perda de solo	Mínimo	Máximo	Amplitude	Média	Desvio padrão
muito baixa	0,00	125,70	125,70	9,90	15,16
baixa	0,05	201,33	201,29	40,53	34,44
média	0,16	400,68	400,52	25,36	43,37
alta	0,29	428,35	428,06	21,17	22,89
muito alta	0,56	402,51	401,95	39,19	24,44

Tabela 5. Presença de cada classe de uso da terra por classe de perda de solo.

Classes de uso da terra	Classes perda de solo	Muito baixa	Baixa	Média	Alta	Muito alta
	Fator C	% de área do uso por classe de perda de solo				
Afloramento rochoso	0,01	0,2	0,2	0,4	0,5	0,5
Água	0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0
Área agrícola	0,2558821	4,1	4,9	6,3	4,3	11,3
Área urbanizada	0,0075	1,6	0,2	0,2	0,1	0,1
Área urbanizada de baixa densidade	0,01	1,7	0,6	0,8	0,4	0,2
Campo de altitude	0,0194	0,2	2,7	1,3	2,0	2,0
Mangue	0,005	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0
Pastagem	0,0288	37,7	31,7	72,9	83,8	75,3
Solo exposto	1	0,0	0,0	0,0	0,1	1,2
Vegetação em estágio inicial de regeneração	0,0007	8,6	11,6	5,1	4,0	4,8
Vegetação em estágio médio de regeneração	0,0001	14,9	5,8	2,5	3,2	3,1
Vegetação em estágio avançado de regeneração	0,0001	30,3	42,4	10,4	1,5	1,4
Total		100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Com base nas tabelas 2 a 5, verifica-se que os fatores erosividade (R) e erodibilidade (K) não apresentaram diferenças em seus valores mínimo, máximo e médio entre as classes de perda de solo. Considerando ainda que o fator P foi considerado constante para toda a área e que os fatores LS e C apresentaram diferenças principalmente entre as classes de muito baixa/baixa, quando comparadas às classes média, alta e muito alta perda de solos, pode-se concluir que esses dois últimos fatores foram os que mais contribuíram para a definição dessas classes no contexto deste estudo.

Uma comparação entre os resultados obtidos neste trabalho e um mapeamento de áreas erodidas realizado com informações de imagens aéreas, orbitais e de visitas a campo foi realizado e apresentado por Fidalgo et al. (2014).

Considerações Finais e Conclusões

Embora haja limitações do uso da equação universal de perda de solos, seu uso é muito comum. No caso do presente estudo, a aplicação do modelo possibilitou a espacialização de classes de perdas de solos como indicativos dos locais mais ou menos vulneráveis aos processos erosivos, considerando os dados disponíveis e suas escalas.

O uso da ferramenta INVEST para cálculo da equação universal de perda de solos apresentou como vantagem a possibilidade de reunir todos os dados necessários em um mesmo ambiente. Com isso, simplifica-se o processamento e reduz-se a necessidade de transformações dos dados, reduzindo a possibilidade de ocorrerem erros.

Mesmo sendo um modelo simplificado, que emprega poucas variáveis, a grande limitação à sua aplicação é a dificuldade em se obter os dados necessários. No caso do fator C, foram utilizados dados de literatura e, no caso do fator K, embora resultado de um levantamento de solos recente e em escala adequada para a bacia (1:50.000) a forma dos dados (polígonos com valor final de erodibilidade) não permitiu uma análise dos valores e os diferentes tipos de solos relacionados.

Referências

ÁLVARES, M. T. P.; PIMENTA, M. T. Erosão hídrica e transporte sólido em pequenas bacias hidrográficas, 9 p. In: CONGRESSO DA ÁGUA, 4., 1998, Lisboa. **Atlas...** Lisboa: Associação Portuguesa de Recursos Hídricos, 1998.

AMADOR, E. S. **Baía de Guanabara e ecossistemas periféricos: homem e natureza.** 1997. 539 f. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade Federal do Rio de Janeiro - Instituto de Geociências, Rio de Janeiro, RJ.

ARAÚJO, E. P. de. **Aplicação de dados SRTM à modelagem da erosão em microbacias por Geoprocessamento**. 2006. 88 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP.

BENAVIDES, Z. C.; CINTRÃO, R. P.; FIDALGO, E. C. C.; PEDREIRA, B. C. C. G.; PRADO, R. B. **Consumo e abastecimento de água nas bacias hidrográficas dos rios Guapi-Macacu e Caceribu, RJ**. Rio de Janeiro, RJ: Embrapa Solos, 2009.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do Solo**. Piracicaba, SP: Livroceres, 392 p. 1985.

COMPERJ - POTENCIAL DE DESENVOLVIMENTO PRODUTIVO: ESTUDOS PARA O DESENVOLVIMENTO PRODUTIVO DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO. Rio de Janeiro, RJ: FIRJAN: FGV, n. 1, 2008.

COSTA, T. C. C.; LUMBRERAS, J. F.; ZARONI, M. J.; NAIME, U. J.; GUIMARÃES, S. P.; UZÊDA, M. C. **Estimativas de perdas de solo para microbacias hidrográficas do estado do Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro, RJ: Embrapa Solos, 2005.

COUTINHO, B. H. **Domínios geo-hidroecológicos e padrões de fragmentação da Mata Atlântica, bacia do Rio Macacu – RJ, 2000**. 156 f. 2000. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ.

FIDALGO, E. C. C.; JÚNIOR, W. C.; GODOY, M. D. P.; Análise da qualidade do modelo digital de elevação para representação da Bacia Hidrográfica do Rio Guapi-Macacu, RJ, estado do Rio de Janeiro. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14., 2009, Natal, RN. **Anais...** Natal, RN: INPE, p. 3785-3791. 2009.

FIDALGO, E.C.C.; THOMPSON, D; LIMA, E. P.; GONÇALVES, A. O.; SCHULER, A. E.; LAUREANO, I. C. M. **Estimativa da erosividade nas bacias hidrográficas dos rios Guapi-Macacu e Caceribu**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2012. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 205).

FIDALGO, E. C. C.; THOMPSON, D.; LIMA, E. P.; GONÇALVES, A. O.; SCHULER, A. E.; LAUREANO, I. C. M. Estimativa da erosividade nas bacias hidrográficas dos rios Guapi-Macacu e Caceribu. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 16., 2013, Foz do Iguaçu, PR. **Anais...** São José dos Campos, SP: INPE, 7 p. 2013.

FIDALGO, E. C. C.; THOMPSON, D.; TORRES, F. E. N. DE; MENDONÇA, R. N. Análise comparativa entre estimativa de perda de solos e ocorrências de erosão: estudo de caso na bacia hidrográfica do Rio Guapi-Macacu, RJ. In: Seminário da Rede Agrohidro, 2., 2014, Campinas, SP. **Impactos da agricultura e das mudanças climáticas nos recursos hídricos: anais.** Campinas, SP: Embrapa Informática Agropecuária, p. 187-190. 2014.

GONÇALVES, F. A.; SILVA, D. D.; PRUSKI, F. F.; CARVALHO, D. F.; CRUZ, E. S. Índice e espacialização da erosividade das chuvas para o estado do Rio de Janeiro. **Revista brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v. 10, n. 2, p. 269-276, 2009.

MAFFRA, C. Q. T.; MAZZOLA, M. As razões dos desastres em território brasileiro. In: SANTOS, R. F. dos. (Org.). **Vulnerabilidade Ambiental: desastres naturais ou fenômenos induzidos?** Brasília, DF: MMA, c. 1, 192 p. 2007.

MORGAN, R. P. C. **Soil erosion and conservation.** 3. ed. Malden, EUA: Blackwell, 2005.

PEDREIRA, B. C. C. G., FIDALGO, E. C. C., PRADO, R. B., CINTRÃO, R. P., BENAVIDES, Z. C. **Síntese do cenário contemporâneo da oferta e consumo de água nas bacias hidrográficas dos Rios Guapi-Macacu e Caceribu.** Rio de Janeiro, RJ: Embrapa Solos, 2010.

PEDREIRA, B. C. C. G.; FIDALGO, E. C. C.; PRADO, R. B.; FADUL, M. J.; BASTOS, E. C.; SILVA, S. A.; ZAINER, N. G.; PELUZO, J. **Dinâmica de uso e cobertura da terra nas bacias hidrográficas do Guapi-Macacu e Caceribu – RJ.** Rio de Janeiro, RJ: Embrapa Solos, 66 p. 2009.

TALLIS, H.; RICKETTS, T., GUERRY, A.; WOOD, S.; SHARP, R. **InVEST 2.3.0 user's guide: interated valuation of environmental services and tradeoffs. 2012.** Disponível em: <<http://www.naturalcapitalproject.org/InVEST.html>>. Acesso em: 27 nov. 2012.

THOMPSON, D.; FIDALGO, E. C. C.; MENDONÇA, R. N.; Análise da distribuição dos fragmentos da Mata Atlântica na Bacia Hidrográfica do Rio Guapi-Macacu – RJ. Rio de Janeiro. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15., 2011, Curitiba, PR. **Anais...** São José dos Campos, SP: INPE, 8 p. 2011.

WEILL, M. A. M.; PIRES NETO, A. G. P. Erosão e assoreamento. In: SANTOS, R. F. dos. (org.). **Vulnerabilidade Ambiental: desastres naturais ou fenômenos induzidos?** Brasília, DF: MMA, c. 4, p. 192. 2007.

WISCHMEIER, H. W.; SMITH, D. D. **Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning.** Washington DC: USDA – Department of Agriculture, 58 p. 1978.

Embrapa

Solos