



Revista Brasileira de Cartografia (2012) N<sup>o</sup> 64/4: 429-442  
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto  
ISSN: 1808-0936

## **AVALIAÇÃO DOS DADOS SRTM APLICADOS À MODELAGEM DO FATOR TOPOGRÁFICO DA USLE**

*Assessment of SRTM Data Applied to Modeling the Topographic Factor of USLE*

**Moisés Pereira Galvão Salgado<sup>1</sup>, Antônio Roberto Formaggio<sup>1</sup>  
& Bernardo Friedrich Theodor Rudorff<sup>1</sup>**

**<sup>1</sup>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE**  
**Coordenadoria de Observação da Terra – OBT / Divisão de Sensoriamento Remoto - DSR**  
Av. dos Astronautas, 1.758, Jd. Granja, CEP 12.227-010, São José dos Campos – SP, Brasil.  
{salgado, formag, bernardo}@dsr.inpe.br

*Recebido em 12 de Agosto, 2011/ Aceito em 26 de Novembro, 2011*  
*Received on August 12, 2011/ Accepted on November 26, 2011*

### **RESUMO**

O presente artigo tem como objetivo analisar o fator topográfico do modelo USLE calculado com base nos dados SRTM, comparando-o com o fator topográfico calculado a partir de dados cartográficos nas escalas de 1:10.000 e 1:50.000. Para tanto, foram gerados modelos digitais de elevação (MDE) a partir dos dados da missão SRTM e MDE gerados a partir dos dados das cartas topográficas, servindo como insumo para o cálculo do fator topográfico. Buscou-se, também, avaliar a utilização de diferentes algoritmos de distribuição do fluxo e ainda avaliar a influência do espaçamento da grade na modelagem do fator topográfico. Foi então possível verificar que o fator topográfico modelado a partir dos dados SRTM possibilitou obter resultados semelhantes aos obtidos por meio das cartas topográficas nas escalas 1:10.000 ( $R = 0,84$ ) e 1:50.000 ( $R = 0,65$ ). Desta forma, concluiu-se que a estimativa do fator topográfico a partir dos dados SRTM é adequada e pode beneficiar a modelagem da erosão em áreas que carecem de dados cartográficos com escalas adequadas ao cálculo do fator topográfico da USLE.

**Palavras chaves:** Sensoriamento Remoto, Geoprocessamento, Modelagem da Erosão.

### **ABSTRACT**

This paper aims to analyze the topographic factor of USLE erosion model, calculated from SRTM data, comparing it with the results obtained from cartographic data with scale of 1:10.000 and 1:50.000. We generated digital elevation models from SRTM and cartographic data used as input for calculating the topographic factor. The use of different flow routing algorithms and the influence of grid spacing to modeling the topographic factor were evaluated. The results show that the topographic factor modeled from the SRTM data allowed to obtain results similar to those obtained using cartographic data with 1:10,000 scale ( $R = 0.84$ ) and 1:50,000 ( $R = 0.65$ ). We conclude that the topographic factor estimated from the SRTM data is appropriate and can benefit the erosion modeling at areas that lack cartographic data with the adequate scale to calculation of the USLE topographic factor.

**Keywords:** Remote Sensing, Geoprocessing, Erosion Modeling.

## 1. INTRODUÇÃO

O modelo denominado *Universal Soil Loss Equation* (USLE) (WISCHMEIER & SMITH, 1965; 1978) consiste em uma equação desenvolvida empiricamente para estimar a quantidade média de solo perdido em função do processo de erosão hídrica. A USLE é constituída, originalmente, por seis fatores que consideram as características do clima (**R** – *rainfall and runoff factor*), do solo (**K** – *soil erodibility factor*), do relevo (**L** – *slope-length factor* e **S** – *slope-steepness factor*), do uso e cobertura do solo (**C** – *cover and management factor*) e das práticas conservacionistas (**P** – *support practice factor*) em um talhão agrícola. O fator topográfico (**LS** – *topographic factor*) modela a influência do relevo sobre o fluxo do escoamento superficial e é composto pelo produto dos fatores **L** e **S**.

A USLE possibilita a adequação do cálculo de seus fatores às condições e necessidades específicas de uma região e, deste modo, foram desenvolvidas diferentes versões do modelo. Dentre estas, destacam-se: *Modified USLE* (MUSLE) (WILLIAMS, 1975), Equação Universal de Perdas de Solo (EUPS) (BERTONI & LOMBARDI NETO, 1985), USLE-2D (DESMET & GOVERS, 1996), *Revised USLE* (RUSLE) (RENARD *et al.*, 1997), *USLE-Modified* (USLE-M) (KINNEL & RISSE, 1998), *Water and Tillage Erosion Model* (WATEM) (VAN OOST *et al.*, 2000), *Unit Stream Power Erosion and Deposition* (USPED) (WARREN *et al.*, 2005). Desta forma, a USLE pode ser considerada o modelo de erosão mais difundido e utilizado (MERRIT *et al.*, 2003).

Com o desenvolvimento dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG) e a disponibilização de dados de Sensoriamento Remoto (SR), a USLE passou a ser empregada para avaliar a degradação em grandes áreas, possibilitando estimar a abrangência dos processos erosivos e sua intensidade. Dentre estes, os dados SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), disponibilizados de modo gratuito e com abrangência nacional, fornecem informações topográficas necessárias à modelagem da erosão, possibilitando estimar o fator LS da USLE (KING *et al.*, 2005; VRIELING, 2006).

Neste sentido, o presente trabalho teve como principal objetivo avaliar o fator LS calculado a partir dos dados SRTM, comparando-o com os calculados a partir de Modelos Digitais de Elevação

(MDE) gerados com base nas cartas topográficas com escalas de 1:10.000 e 1:50.000, visando quantificar a influência do MDE e dos diferentes métodos para modelagem da distribuição do fluxo na precisão dos resultados.

Deste modo, objetivou-se verificar o potencial dos dados SRTM para o cálculo do fator LS em substituição aos MDE gerados a partir das cartas topográficas, para modelagem da erosão em áreas com ausência destes ou carência de dados com escalas adequadas à geração de MDE visando a modelagem do fator LS. Buscou-se avaliar a utilização de diferentes algoritmos para estimar a concentração do fluxo do escoamento superficial nas superfícies dos MDE e também verificar a influência do espaçamento da grade do MDE na modelagem do fator LS.

### 1.1 Modelagem do fator topográfico

Desde as primeiras tentativas para modelar os processos erosivos, as características topográficas das vertentes são consideradas no equacionamento do potencial de erosão do escoamento superficial da água (LAFLÉN & MOLDENHAUER, 2003). Originalmente, o fator LS da USLE é calculado com base no comprimento ( $\lambda$ ) e na declividade ( $\theta$ ) da vertente.

Entretanto, o fator L em sua concepção original não se adequa à modelagem da influência das formas do relevo sobre o escoamento superficial (MOORE & BURCH, 1986), utilizando apenas a variável comprimento de rampa ( $\lambda$ ) para estimar o potencial erosivo da concentração do fluxo. Desta forma, para considerar a interação das formas convergentes e divergentes do relevo e suas influências sobre o fluxo do escoamento superficial, a variável área de captação ( $A_c$ ) mostra-se mais

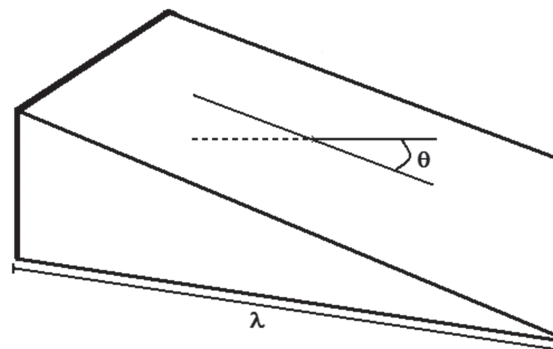


Fig. 1 – Comprimento de rampa ( $\lambda$ ) e ângulo de declividade ( $\theta$ ) em uma vertente regular plana.

adequada para avaliar o potencial de concentração do fluxo (KIRKBY & CHORLEY, 1967).

Com base na teoria de energia do fluxo (YANG, 1972; 1984) foi desenvolvido um fator L adequado à modelagem da influência da forma do relevo sobre o escoamento superficial, utilizando a área de captação específica ( $A_s$ ) em substituição à variável comprimento de rampa ( $\lambda$ ) (MOORE & BURCH, 1986; MOORE & WILSON, 1992), conforme apresentado na Equação 1.

$$L = (A_s / 22,13)^m \quad (1)$$

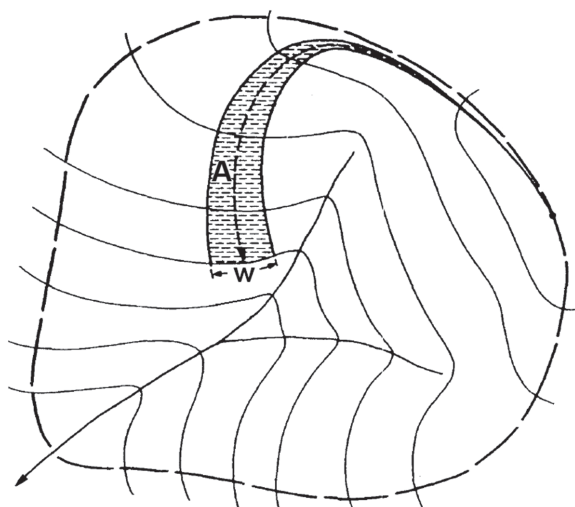


Fig. 2 – Representação da área de captação ( $A_c$ ) e da largura do fluxo ( $w$ ). Fonte: Moore e Wilson (1992).

Desta forma, a área de captação específica ( $A_s$ ) é calculada com base na área de captação ( $A_c$ ) e na largura do fluxo ( $w$ ) de uma determinada área, por meio da Equação 2, enquanto que o expoente ( $m$ ) do fator L é calculado com base no ângulo de declividade ( $\theta$ ) por meio da Equação 3 e Equação 4 (MC COOL *et al.*, 1989).

$$A_s = A / w \quad (2)$$

$$m = \beta / (1 + \beta) \quad (3)$$

$$\beta = (\text{sen } \theta / 0,0896) / [3(\text{sen } \theta)^{0,8} + 0,56] \quad (4)$$

Sendo assim, o fator topográfico pode ser modelado a partir das informações altimétricas contidas no MDE (DESMET & GOVERS, 1996). Para isto é necessário calcular os ângulos de declividade ( $\theta$ ) e orientação de vertentes ( $\phi$ ) e a

área de captação ( $A_c$ ), essenciais ao cálculo das variáveis que compõem o fator topográfico.

Os ângulos  $\theta$  e  $\phi$  de uma célula do MDE podem ser calculados com base no valor de altitude das células adjacentes utilizando-se uma operação de vizinhança (LIU *et al.*, 2009), enquanto que a área de captação é calculada por meio de algoritmos de distribuição do fluxo (*flow routing algorithms*) (O'CALLAGHAN & MARK, 1984; QUINN *et al.*, 1991).

Considerando que o fluxo do escoamento superficial em determinada célula do MDE possui direção e sentido equivalentes ao ângulo de orientação de vertentes ( $\phi$ ), a largura do fluxo que passa por esta célula pode ser calculada por meio da Equação 5, onde  $D$  corresponde ao espaçamento da grade do MDE.

$$w = D (\text{sen } \phi + \text{cos } \phi) \quad (5)$$

Existem diferentes fórmulas para calcular o fator S com base no ângulo de declividade (WISCHMEIER & SMITH, 1978; MC COOL *et al.*, 1987), no entanto a Equação 6 é diferenciada por adequar-se à modelagem da erosão em áreas de baixa e alta declividade (NEARING, 1997).

$$S = -1,5 + 17 / [1 + \exp^{(2,3 - 6,1 \text{sen } \theta)}] \quad (6)$$

## 1.2 Potenciais e limitações dos dados SRTM

O cálculo do fator topográfico a partir do MDE possibilita estimar o potencial erosivo do escoamento superficial, considerando as características hidrológicas do terreno (KINNEL, 2005). Sendo assim, a disponibilidade de dados altimétricos para geração de MDE adequados ao cálculo do fator LS é essencial para a modelagem da erosão em grandes áreas por meio da USLE e suas variações.

Apesar de os dados cartográficos fornecerem informações altimétricas para a geração de MDE (WISE, 2000; 2007), atualmente existem opções para gerar MDE a partir de dados obtidos por SR orbital, possibilitando modelar a erosão em áreas que não dispõem de dados cartográficos com escala adequada para a geração de MDE (VRIELING, 2006). Neste sentido, os dados SRTM são frequentemente utilizados para modelagem da erosão em bacias hidrográficas por meio da USLE

e suas variações (ROMPAEY *et al.*, 2005; VERSTRAETEN, 2006; HUI *et al.*, 2010; SHINDE *et al.*, 2011).

Os dados SRTM foram adquiridos por meio de um sistema de coleta de dados interferométricos a bordo do ônibus espacial *Endeavour*, utilizando dois conjuntos de sensores SAR (*Synthetic Aperture Radar*) nas bandas C e X separados por um mastro de 60 metros, visando disponibilizar dados topográficos da superfície terrestre entre as latitudes 60° norte e 56° sul (RABUS *et al.*, 2003).

Os dados SRTM banda C, com resolução de três arcos-segundo (aproximadamente 90 metros), são disponibilizados publicamente na internet. As fontes de erros interferométricos e os erros aleatórios destes dados, estimados para América do Sul, apresentaram erro absoluto de localização de 9 m, erro absoluto de altitude de 6,2 m e erro relativo de altitude de 5,5 m, sendo que o erro absoluto é calculado em relação ao conjunto total dos dados e o relativo refere-se a uma escala local de 200 km (RODRÍGUEZ *et al.*, 2006).

Estudos sobre precisão altimétrica dos dados SRTM realizados para regiões do Brasil demonstram que na Amazônia os dados SRTM apresentam uma precisão vertical satisfatória, permitindo a geração do MDE mais preciso do que o MDE obtido a partir de cartas topográficas na escala 1:100.000 (SANTOS *et al.*, 2006). Estudos realizados para a região do Planalto das Araucárias, situado no Rio Grande do Sul e caracterizado por um relevo escarpado e declivoso, apontam que o MDE obtido a partir dos dados SRTM mostrou-se mais preciso do que o MDE obtido a partir de cartas topográfica na escala 1:50.000 (PINHEIRO, 2006).

Entretanto, é importante considerar que os valores de altitude apresentados nos dados SRTM representam as superfícies refletivas (dossel de árvores, telhados de edificações etc.) podendo ocultar feições topográficas da superfície do terreno ou apresentar falsos canais que podem influenciar na modelagem da concentração do fluxo (VALERIANO *et al.*, 2006).

Em geral, os MDE podem apresentar erros variados de acordo com as fontes de origem e métodos de interpolação dos dados altimétricos, fazendo-se necessário conhecer os possíveis problemas inerentes a cada MDE e suas implicações nas diversas aplicações destes (FISHER & TATE, 2006; CHAPLOT *et al.*, 2006).

Convém ressaltar a necessidade de avaliar o potencial e as limitações dos dados SRTM e de dados cartográficos de diferentes escalas aplicados à modelagem do fator topográfico da USLE.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Caracterização da área de estudo

Na seleção da área de estudo foi considerada a disponibilidade e a acessibilidade de dados cartográficos publicados nas escalas de 1:10.000 e de 1:50.000, digitalizados e vetorizados. Selecionou-se a bacia do rio Una, apresentada na Fig. 4c, por apresentar uma variedade topográfica adequada para os propósitos deste estudo.

A bacia do rio Una, com área total de 476 km<sup>2</sup>, é um dos mais importantes tributários do rio Paraíba do Sul no estado de São Paulo. Está situada

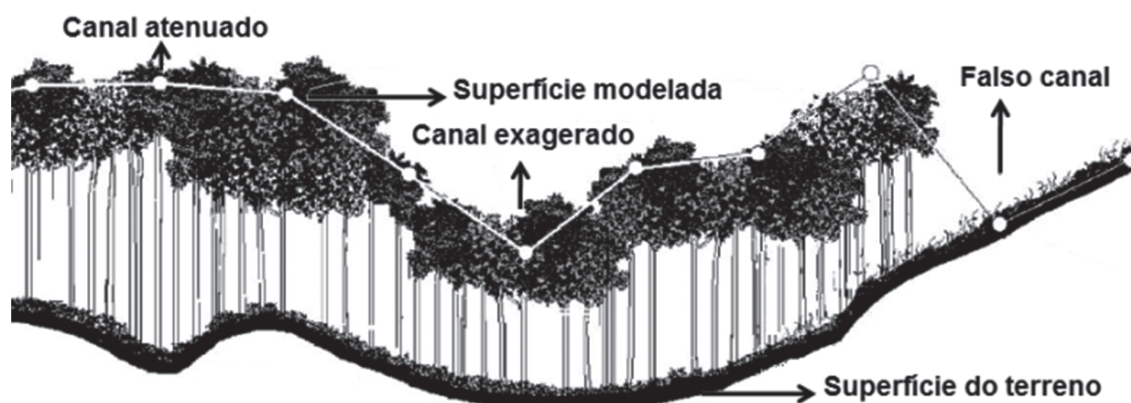


Fig. 3 – Efeitos do dossel presentes nos dados SRTM. Fonte: Adaptado de Valeriano *et al.* (2006).

na margem direita do rio Paraíba do Sul e sua área abrange os municípios de Pindamonhangaba (8%), Redenção da Serra (1%), Taubaté (84%) e Tremembé (7%). As formas do relevo presentes na bacia apresentam superfícies aplainadas com interflúvios sem orientação, morros de serras restritas e de topos arredondados. As vertentes em geral possuem perfis convexos ou retilíneos, cujas altitudes oscilam entre 500 e 1.500 metros e as declividades variam de 20 a 60% (BATISTA *et al.*, 2006).

## 2.2 Geração dos Modelos Digitais de Elevação

Para gerar os MDE da área de estudo a partir dos dados cartográficos vetorizados (isolinhas e pontos cotados), foram necessárias trinta e sete cartas com escala de 1:10.000 do Instituto Geográfico e Cartográfico do Estado de São Paulo (IGC) numeradas de acordo com o mapa índice dos projetos de mapeamento (IGC, 1998) (Fig. 5a) e quatro cartas com escala de 1:50.000 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) (Fig.

5b). Os dados vetoriais foram interpolados utilizando a ferramenta ‘*topo to raster*’ do SIG ArcMap (ESRI, 2008) para gerar as grades regulares dos valores de altitude, correspondentes aos MDE empregados no cálculo do fator LS.

Os dados SRTM disponibilizados no *site* <<http://dds.cr.usgs.gov/srtm/>> pelo *United States Geological Survey* (USGS) foram utilizados para gerar os MDE de grades regulares com as mesmas características e dimensões dos MDE gerados com base nos dados cartográficos, visando a compatibilização de operações pontuais entre as grades resultantes. Para isto, foram necessárias duas grades SRTM (Fig. 5c).

A geração dos MDE a partir dos dados SRTM utilizou a geoestatística para interpolação dos dados altimétricos. As grades SRTM foram convertidas para o formato vetorial de dados, utilizando a ferramenta ‘*RASTERVECTOR*’ do SIG Idrisi (EASTMAN, 2006), gerando um conjunto de pontos contendo os valores de altitude armazenados nas células das grades SRTM. A ferramenta ‘*PROJECT*’ foi empregada para projetar o conjunto de pontos utilizando o sistema

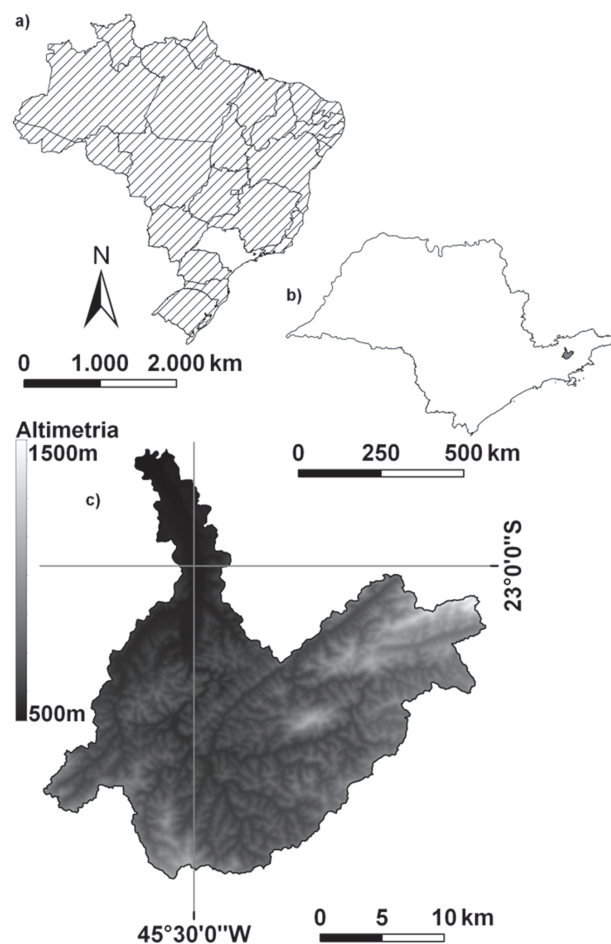


Fig. 4 – Localização geográfica e altimetria da bacia do Una (c), situada no Estado de São Paulo (b), Brasil (a).

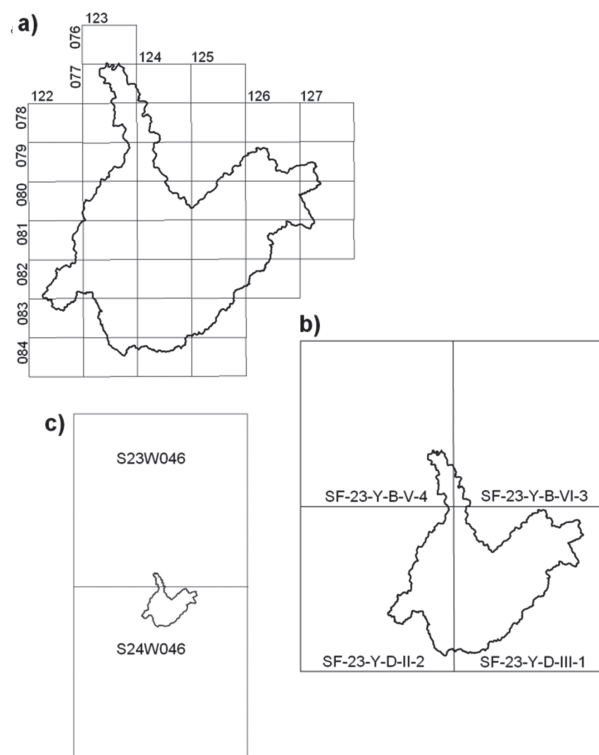


Fig. 5 – Articulação das cartas do IGC (a) e IBGE (b), e das grades SRTM (c) utilizadas para geração dos MDE.

de projeção Universal Transverso de Mercator (UTM) zona 23 sul, comum aos dados cartográficos. Ressalta-se a vantagem em se realizar a projeção dos dados altimétricos no formato vetorial por conservar os valores de altitude originais dos dados SRTM, dispensando a interpolação necessária para a projeção de dados no formato matricial.

A partir do conjunto de pontos gerado foram realizadas as análises de estatística exploratória e geoestatística. Em seguida, foi realizada a modelagem do semivariograma omnidirecional padronizado por meio da ferramenta ‘*Grid/New variogram*’ do aplicativo Surfer (GOLDEN SOFTWARE, 2009) com base nos resíduos obtidos a partir da remoção da tendência de primeira ordem do conjunto de pontos. A ferramenta ‘*Grid/Data/Kriging*’ foi utilizada para interpolar o conjunto de pontos com base nos coeficientes geoestatísticos estimados (alcance 2800 metros, contribuição 0,8 e efeito pepita 0,005) e gerar as grades regulares dos MDE.

Deste modo, foram gerados três MDE com grades regulares de 30m x 30m, 60m x 60m e 90m x 90m a partir de cada conjunto de dados, totalizando nove diferentes MDE utilizados para o cálculo das variáveis topográficas e a consecutiva modelagem do fator topográfico da USLE.

### 2.3 Cálculo do fator topográfico

Após a geração dos MDE, estes foram importados e processados utilizando o SIG System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) (BÖHNER et al., 2006). Foi realizado o pré-processamento dos MDE, no qual foram removidas as depressões espúrias das superfícies interpoladas, utilizando a ferramenta ‘*sink removal*’ visando adequar os MDE à modelagem do fluxo do escoamento superficial.

As variáveis topográficas declividade ( $\theta$ ) e orientação de vertentes ( $\varphi$ ) foram calculadas para cada MDE utilizando o método das diferenças finitas de segunda ordem (ZEVENBERGEN & THORNE, 1987) por meio da ferramenta ‘*Morphometry*’. Para calcular a área de captação ( $Ac$ ) foram empregados dois diferentes métodos: o algoritmo de fluxo simples denominado *Deterministic 8 (D8)* (O’CALLAGHAN & MARK, 1984) e o algoritmo de fluxo múltiplo conhecido como *Multiple Flow Directions (MFD)*

(QUINN et al., 1991), por meio da ferramenta ‘*Hydrology*’.

As variáveis  $\theta$ ,  $\varphi$  e  $Ac$  calculadas a partir de cada um dos nove MDE gerados foram empregadas para calcular o fator L por meio da Equação 1. Para cada MDE foram geradas duas grades do fator L, devido à utilização dos diferentes algoritmos *D8* e *MFD*.

O fator S foi calculado com base nos valores da variável  $\theta$  por meio da Equação 6. As grades do fator L de cada MDE foram multiplicadas pelas respectivas grades do fator S. Desta forma, foram geradas duas grades do fator LS para cada MDE avaliado, totalizando 18 grades do fator topográfico analisadas.

As grades do fator LS resultantes foram comparadas por meio da análise da distribuição e dispersão dos valores, diferença entre grades e análise de correlação. Para auxiliar as análises, utilizou-se uma transformação logarítmica (*i.e.* logaritmo natural) dos valores do fator LS de modo a aprimorar a visualização da dispersão dos resultados. Foram utilizados conjuntos de 2000 pontos amostrados aleatoriamente para a realização das análises de correlação, de modo a minimizar a influência da autocorrelação espacial do fator LS. Um teste de hipótese *t-Student* ( $p = 0,05$ ) foi empregado de modo a confirmar a significância dos coeficientes de correlação obtidos.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise das distribuições de valores do fator LS calculado a partir dos diferentes MDE permitiu

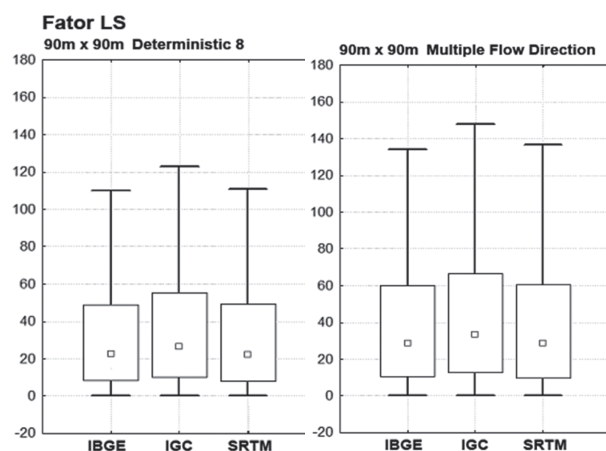


Fig. 6 – Distribuição dos valores do fator LS calculado a partir dos diferentes MDE utilizando os algoritmos *D8* (esquerda) e *MFD* (direita).

verificar que os conjuntos de valores apresentaram distribuição semelhante, conforme representado na

Analisando a Fig. 6 é possível verificar que o fator LS calculado por meio da utilização do algoritmo de fluxo simples *D8* apresentou distribuições de valores com menores amplitudes e médias em relação às distribuições de valores do fator LS obtido utilizando o algoritmo de fluxo múltiplo *MFD*.

Analisando a Fig. 6. é possível observar que, em geral, o fator LS calculado a partir dos dados IGC apresenta valores, em média, maiores que os obtidos a partir dos dados SRTM, enquanto que os valores do fator LS calculado com base nos dados IBGE são, em média, menores.

A análise visual das grades do fator LS, obtidas a partir dos diferentes MDE, revelou poucas diferenças na distribuição espacial do fator LS. De maneira geral, todos os MDE avaliados permitiram a identificação das áreas de relevo com alto potencial erosivo em função da concentração e energia do fluxo do escoamento superficial, modelados pelo fator LS.

Foi possível verificar que os valores do fator LS calculados a partir de cada MDE avaliado apresentaram pequenas diferenças em função das características das superfícies dos MDE e dos métodos para determinação da concentração do fluxo do escoamento superficial. Deste modo, os

dados das cartas topográficas do IGC na escala 1:10.000 beneficiaram a criação de superfícies mais detalhadas em relação aos dados das cartas topográficas do IBGE na escala 1:50.000 que favoreceram a suavização das superfícies dos MDE de forma semelhante aos dados SRTM.

Os MDE gerados a partir das cartas topográficas do IGC permitiram estimar os valores de declividade com maior detalhamento, favorecendo a detecção de áreas com alta declividade, menos perceptíveis nas superfícies dos MDE gerados a partir das cartas topográficas do IBGE e dos dados SRTM. Deste modo, os valores do fator LS obtidos a partir das cartas do IGC melhor traduzem o potencial erosivo característico das formas do terreno. Entretanto, os MDE derivados das cartas do IBGE e dos dados SRTM possibilitaram estimativas semelhantes às alcançadas pelos MDE originados a partir das cartas do IGC, principalmente quando utilizado um MDE com espaçamento de grade de 90m x 90m e o algoritmo de fluxo múltiplo *MFD* para modelagem da concentração do escoamento superficial no terreno.

A análise da diferença entre as grades do fator LS calculado a partir dos diferentes MDE indicou que os resultados obtidos com base nos dados SRTM, quando comparados aos resultados fornecidos pelos dados das cartas topográficas do IGC, apresentaram valores de diferença média

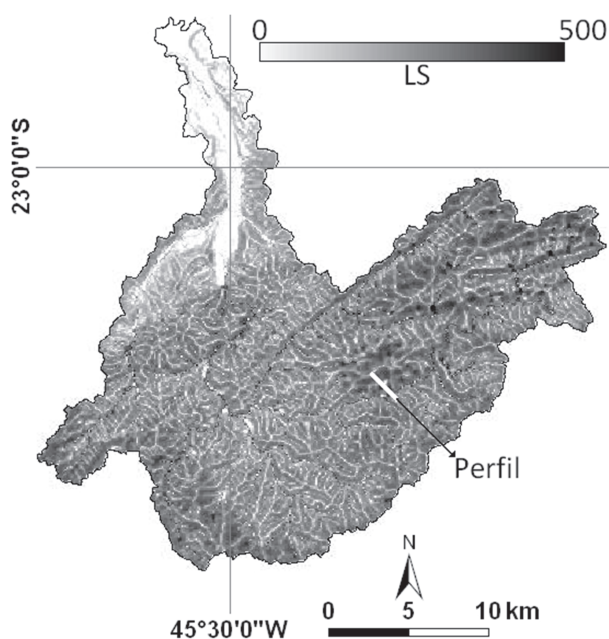


Fig. 7 – Distribuição espacial do fator topográfico calculado utilizando o algoritmo *MFD* a partir do MDE 90m x 90m gerado a partir dos dados SRTM.

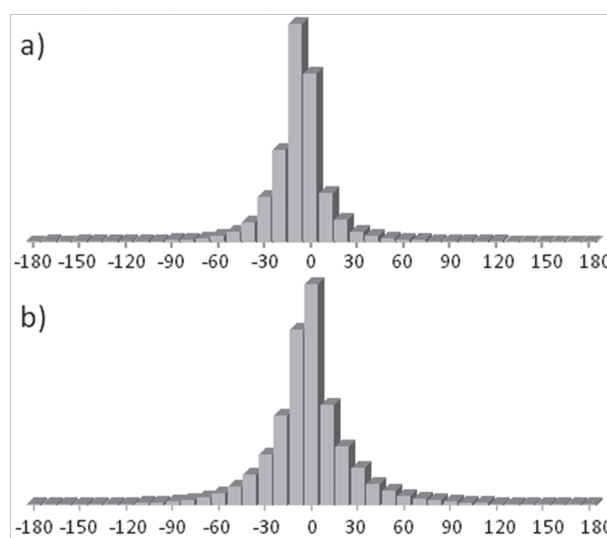


Fig. 8 – Histogramas das diferenças entre as grades do fator LS calculado utilizando o algoritmo de fluxo múltiplo *MFD* e grade de 90m x 90m a partir do MDE gerado com base nos dados SRTM em relação aos resultados obtidos com os dados IGC (a) e IBGE (b).

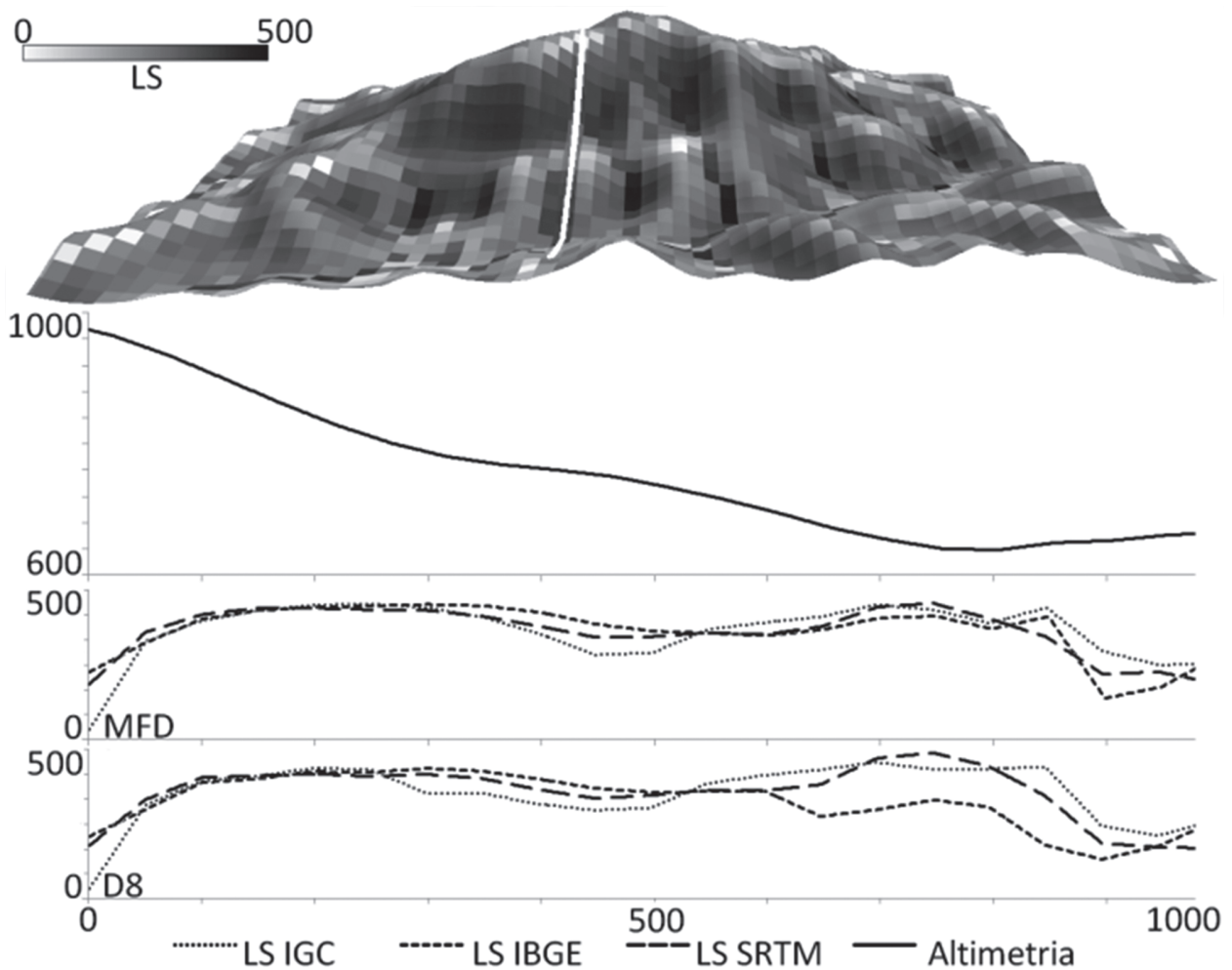


Fig. 9 – Representação em perspectiva da distribuição dos valores do fator LS calculados a partir dos dados SRTM utilizando o algoritmo MFD em uma vertente e perfil altimétrico acompanhado da variação dos valores do fator LS calculados a partir dos MDE 90m x 90m.

menores que zero. Entretanto, quando comparados aos resultados fornecidos pelos dados das cartas topográficas do IBGE apresentaram diferença média maiores que zero. Deste modo, observou-se que os dados SRTM, em relação aos dados das cartas topográficas do IGC, possibilitaram valores subestimados do fator LS, enquanto que em relação aos dados das cartas topográficas do IBGE favoreceram valores superestimados do fator LS.

Foi possível notar que as distribuições de valores das diferenças entre o fator LS calculado com base nos dados SRTM e o calculado a partir dos dados IGC apresentaram desvio padrão menor do que as distribuições de valores das diferenças entre o fator LS calculado com base nos dados SRTM e o calculado a partir dos dados das cartas topográficas do IBGE, conforme ilustrado na Fig. 8.

A análise do perfil altimétrico, apontado na Fig. 7 e representado na Fig. 9, permite observar

que os valores do fator LS calculados a partir dos diferentes MDE são mais semelhantes na parte mais alta de uma vertente (próxima ao divisor de águas) do que na parte baixa da vertente (próxima à base). Isto ocorre devido às maiores diferenças na área de captação acumulada na base da vertente, ocasionadas devido à diferente distribuição do fluxo sobre as superfícies dos MDE ao longo da vertente.

Deste modo, ressalta-se que, diferentemente das variáveis declividade ( $\theta$ ) e orientação de vertente ( $\varphi$ ), os valores da variável área de captação ( $A_c$ ) são influenciados não só pelos valores da vizinhança local de uma determinada célula, mas sim por todo o conjunto de células à montante que contribuem para a acumulação do fluxo do escoamento superficial na célula em análise.

Pôde-se observar que o algoritmo de fluxo múltiplo *MFD* favoreceu estimativas do fator LS mais semelhantes entre os diferentes MDE do que as alcançadas por meio do algoritmo de fluxo



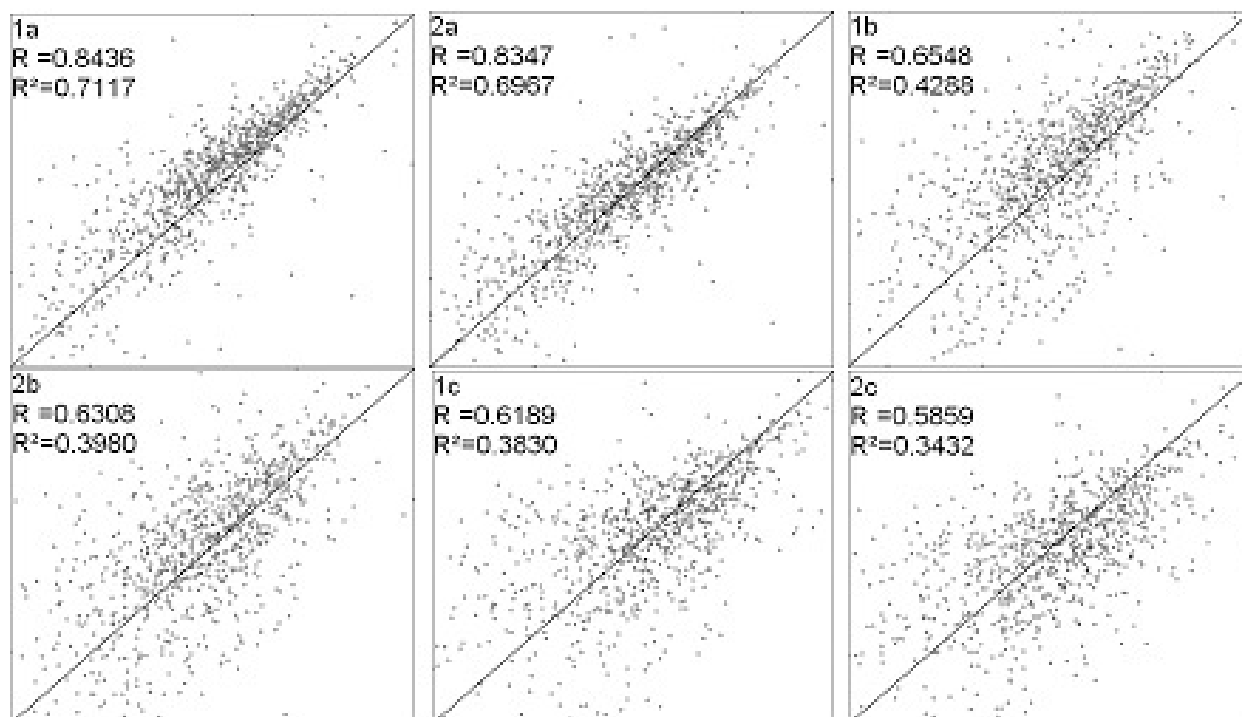


Fig. 9.1 – Diagramas de dispersão dos valores do fator topográfico calculado utilizando os algoritmos de fluxo múltiplo (1) e fluxo simples (2) e análise de correlação dos resultados: a) obtidos a partir dos dados SRTM(x) e IGC(y); b) SRTM(x) e IBGE(y); c) IBGE(x) e IGC(y), utilizando os MDE com espaçamento de 90m x 90m.

simples *D8*. Isto é ocasionado pelas características da distribuição do fluxo nos diferentes algoritmos. Enquanto o algoritmo de fluxo simples *D8* pode ter a direção de fluxo totalmente modificada devido a uma pequena diferença na altitude de uma célula de um MDE, ocasionando uma maior diferença nos valores do fator LS, o algoritmo de fluxo múltiplo *MFD* possui a vantagem de distribuir o fluxo acumulado em uma célula para todas as células vizinhas de menor altitude, possibilitando o cálculo da área de captação de forma menos susceptível à influência de pequenas variações na altitude das células de mesma posição nos diferentes MDE.

Observou-se que a utilização do algoritmo de fluxo múltiplo *MFD* para o cálculo do fator LS favoreceu resultados mais semelhantes entre os diferentes MDE. A análise da Fig. 10 possibilita visualizar a dispersão dos resultados do fator LS obtidos a partir dos MDE com espaçamento de 90m x 90m e os coeficientes de correlação (*R*) e determinação (*R*<sup>2</sup>) alcançados.

A análise de correlação dos resultados permitiu verificar que o fator LS calculado a partir dos dados SRTM é mais semelhante ao fator LS obtido com base nos dados IGC (Fig. 9; 1a e 2a)

do que ao obtido com base nos dados IBGE (Fig. 9; 1b e 2b). Além disso, os resultados possibilitados pelos dados SRTM foram mais semelhantes aos resultados alcançados por meio dos dados IGC (Fig. 9; 1a e 2a) do que os conseguidos por meio da utilização dos dados IBGE (Fig. 9; 1c e 2c).

Nota-se que as maiores correlações foram obtidas a partir das comparações realizadas entre os resultados calculados utilizando o algoritmo de fluxo múltiplo utilizando-se os MDE com espaçamento de 90m x 90m. Neste sentido, a maior correlação observada (*R* = 0,84) foi entre o fator LS calculado utilizando o algoritmo *MFD* com base nos MDE com espaçamento de grade de 90m x 90m derivados dos dados SRTM e IGC.

A correlação obtida com base nos resultados alcançados a partir dos dados IBGE em comparação aos obtidos com base nos dados IGC foi menor (*R* = 0,61) que a obtida por meio dos dados SRTM. A menor correlação observada (*R* = 0,28) ocorreu entre o fator LS calculado utilizando o algoritmo *D8* com base nos MDE com espaçamento de grade de 30m x 30m derivados dos dados SRTM e IBGE.

Os espaçamentos de grade utilizados para geração dos MDE assim como os algoritmos de distribuição do fluxo empregados para a modelagem do fator LS influenciaram significativamente na correlação dos resultados obtidos. Analisando a Fig. 10 e a Fig. 11 pode-se notar que as diferenças causadas pela utilização dos diferentes algoritmos de distribuição de fluxo foram mais acentuadas quando utilizados os MDE com espaçamento de grade de 30m x 30m.

Foi possível verificar que as diferenças observadas nos valores do coeficiente  $R$  devido à utilização dos diferentes algoritmos de distribuição de fluxo diminuem à medida que o espaçamento da grade do MDE aumenta e favorece a geração de superfícies menos detalhadas, contribuindo para uma análise generalizada da concentração do fluxo do escoamento superficial e conseqüente potencial erosivo. Todavia, conforme exposto por Salgado *et al.* (2011) o espaçamento da grade do MDE pode influenciar na identificação das áreas mais susceptíveis à erosão e, por isto, deve ser empregado um espaçamento de grade que permita a representação das formas do relevo.

Em todas as análises de correlação, verificou-se que os coeficientes  $R$  foram significativos. Do mesmo modo, em todas as análises realizadas utilizando um mesmo algoritmo de distribuição de fluxo e mesmo espaçamento de grade do MDE, observou-se uma maior correlação entre os dados SRTM e IGC do que entre os dados SRTM e IBGE ou IBGE e IGC.

Desta forma, pôde-se verificar que o potencial de aplicação dos dados SRTM para a modelagem do fator LS empregado na USLE é semelhante ao possibilitado pela utilização de dados cartográficos com escalas maiores que 1:50.000 e menores que 1:10.000.

Constatou-se que a utilização do algoritmo de fluxo múltiplo *MFD* para o cálculo do fator LS com base no MDE com espaçamento de grade de 90m x 90m gerado a partir dos dados SRTM possibilitou resultados mais próximos aos obtidos a partir do MDE de mesmo espaçamento de grade, gerado a partir dos dados cartográficos IGC com escala de 1:10.000. Neste sentido, o emprego das cartas topográficas do IBGE na escala de 1:50.000 para geração de MDE visando a modelagem da erosão por meio da distribuição do fluxo do escoamento superficial modelado pode ser desfavorável em relação à utilização dos dados SRTM.

Apesar das diferenças metodológicas, os resultados obtidos por Datta e Kirchner (2010) ao analisarem o fator LS obtido com base nos dados SRTM com o calculado a partir de cartas topográficas na escala 1:50.000 em uma bacia hidrográfica próxima aos Himalaias no norte da Índia, indicam a eficiência dos dados SRTM em substituição aos dados cartográficos na escala 1:50.000 ou menores.

Ressalta-se que dentre as diferenças metodológicas verificadas no trabalho de Datta e Kirchner (2010), a principal divergência encontra-

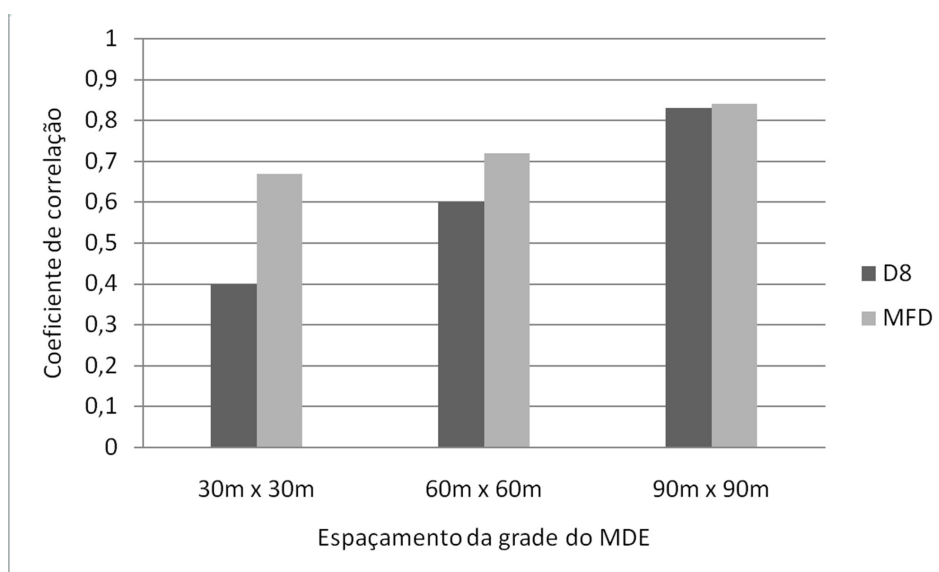


Fig. 10 – Variação do coeficiente de correlação entre o fator LS obtido com base nos dados SRTM e IGC.

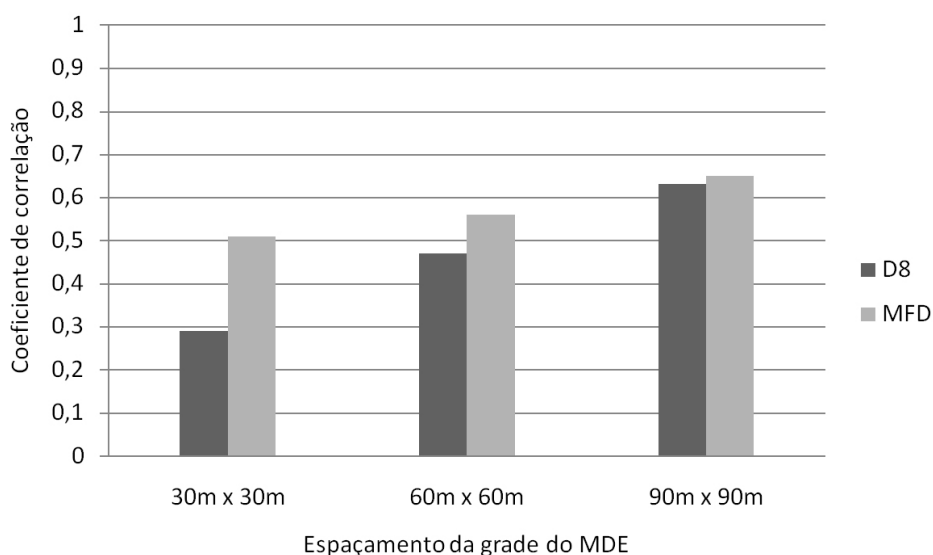


Fig. 11 – Variação do coeficiente de correlação entre o fator LS obtido com base nos dados SRTM e IBGE.

se na utilização da variável comprimento do fluxo (*flow-lengths*) para o cálculo do fator L. No entanto, a utilização da variável área de captação específica (também denominada área de contribuição específica) estimada por meio de algoritmos de fluxo múltiplo permite considerar o escoamento superficial divergente e convergente na modelagem do fator LS, diferentemente de quando modelado por meio de algoritmos de fluxo simples ou por meio da variável comprimento do fluxo.

#### 4. CONCLUSÃO

O presente trabalho avaliou a utilização dos dados SRTM para a modelagem do fator topográfico da USLE, por meio de comparações entre os resultados obtidos a partir destes dados e os obtidos com base em cartas topográficas nas escalas de 1:10.000 e 1:50.000, verificando a influência do espaçamento da grade do MDE e do algoritmo de distribuição de fluxo na modelagem do fator topográfico. Deste modo, conclui-se que a modelagem do fator topográfico a partir dos dados SRTM possibilitou resultados semelhantes aos obtidos por meio dos dados cartográficos, principalmente quando utilizados MDE com espaçamento de grade de 90m x 90m e o algoritmo de fluxo múltiplo.

O emprego de MDE com espaçamento de grade reduzido, assim como a utilização de algoritmos de fluxo simples para modelagem da distribuição do fluxo sob as células do MDE,

diminuiu a semelhança entre os resultados obtidos a partir dos dados SRTM e dados das cartas topográficas. Contudo, a geração de MDE com espaçamentos de grade que permitam a representação da superfície do terreno de forma menos detalhada, assim como o uso de algoritmos de fluxo múltiplo, favoreceu o aumento da semelhança entre os resultados obtidos a partir dos dados SRTM e os dados cartográficos avaliados.

Portanto, a modelagem do fator topográfico utilizando os dados SRTM provou ser adequada quando realizada de forma coerente com a resolução espacial característica dos dados SRTM originais. Deste modo, a modelagem do potencial erosivo relativo às formas do relevo pode ser estimada a partir dos dados SRTM, beneficiando a modelagem da erosão mesmo em áreas com ausência de dados cartográficos com escalas adequadas à geração de MDE visando o cálculo do fator topográfico da USLE.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Laboratório de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto (LAGEO) da Universidade de Taubaté (UNITAU), na pessoa do Dr. Getúlio Teixeira Batista, pela cessão dos dados cartográficos vetorizados.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BATISTA, G. T.; TARGA, M. S.; FIDALGO, E. C. C. **Banco de dados ambientais da Bacia do Rio Una, Bacia do Rio Paraíba do Sul**. Taubaté,

- UNITAU, 2006. Disponível em: <http://www.agro.unitau.br/una>. Acesso: 29 mai. 2010.
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. Piracicaba, Ícone, 1985. 392p.
- BÖHNER, J.; MCCLOY, K. R.; STROBL, J. (Eds.) SAGA - Analysis and Modelling Applications. **Göttinger Geographische Abhandlungen**, v. 115, p. 1-116, 2006.
- CHAPLOT, V.; DARBOUX, F.; BOURENNANE, H.; LEGUEDOIS, S.; SILVEIRA, N.; PHACHOMPHON, K. Accuracy of interpolation techniques for the derivation of digital elevation models in relation to landform types and data density. **Geomorphology**, v. 77, p. 126-141, 2006.
- DATTA, P. S.; KIRCHNER, H. S. Erosion relevant topographical parameters derived from different DEMs - A comparative study from the Indian Lesser Himalayas. **Remote Sensing**, v. 2, p. 1941-1961, 2010.
- DESMET, P. J. J.; GOVERS, G. A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 51, p. 427-433, 1996.
- EASTMAN, J. R. **IDRISI Andes: guide to GIS and Image processing**. Worcester, Clark University, 2006. 328 p.
- ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE (ESRI). **ArcGIS**. 9.3. Redlands, ESRI Inc, 2008.
- FISHER, P. F.; TATE, N. J. Causes and consequences of error in digital elevation models. **Progress in Physical Geography**, v. 30, n. 4, p. 467-489, 2006.
- GOLDEN SOFTWARE. **Surfer: Surface mapping system**. 9.1. Golden, Golden Software Inc. 2009.
- HUI, L.; XIAOLING, C.; LIN, K. J.; XIAOBIN, C.; SAGONG, M. Assessment of soil erosion and sediment yield in Liao watershed, Jiangxi province, China, using USLE, GIS, and RS. **Journal of Earth Science**, v. 21, n. 6, p. 941-953, 2010.
- INSTITUTO GEOGRÁFICO E CARTOGRÁFICO (IGC). **Mapa índice dos projetos de mapeamento 1:10.000**. Divisão Municipal do estado de São Paulo. São Paulo, 1998. Escala 1:1.000.000.
- KING, C.; BAGHDADI, N.; LECOMTE, V.; CERDAN, O. The application of remote-sensing data to monitoring and modelling of soil erosion. **Catena**, v. 62, p. 79-93, 2005.
- KINNELL, P. I. A.; RISSE L. M. USLE-M: Empirical modeling rainfall erosion through runoff and sediment concentration. **Soil Science Society of America Journal**, v. 62, n. 6, p. 1667-1672, 1998.
- KINNEL, P. I. A. Alternative approaches for determining the USLE-M slope length factor for grid cells. **Soil Science Society of America journal**, v. 69, p. 674-680, 2005.
- KIRKBY, M. J.; CHORLEY, R. J. Throughflow, overland flow and erosion. **Hydrological Sciences Journal**, v. 12, n. 3, p. 5-21, 1967.
- LAFLEN, J. M.; MOLDENHAUER, W. C. **Pioneering soil erosion prediction: the USLE story**. Tailândia, WASWC, 2003. 54 p.
- LIU, H.; FOHRER, N.; HORMANN, G.; KIESEL, J. Suitability of S factor algorithms for soil loss estimation at gently sloped landscapes. **Catena**, v. 77, p. 248-255, 2009.
- MC COOL, 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, p. 1387-1396, 1987.
- MCCOOL, D. K.; FOSTER, G. R.; MUTCHLER, C. K.; MEYER, L. D. Revised slope length factor for the Universal Soil Loss Equation. **Transactions of the ASAE**, v. 32, p. 1571-1576, 1989.
- MERRITT, W. S.; LETCHER, R. A.; JAKEMAN, A. J. A review of erosion and sediment transport models. **Environmental Modelling & Software**, v. 18, p. 761-799, 2003.
- MOORE, I. D.; BURCH, G. J. Physical basis of the length-slope factor in the universal soil loss equation. **Soil Science Society of America journal**, v. 50, n. 5, p. 1294-1298, 1986.
- 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.
- NEARING, M.A. A single, continuous function for slope steepness influence on soil loss. **Soil Science Society of America Journal**, v. 61, n. 3, p. 917-919, 1997.
- O'CALLAGHAN, J. F.; MARK, D. M. The extraction of drainage networks from digital elevation data. **Computer Vision, Graphics, and Image Processing**, v. 28, p. 323-344, 1984.
- PINHEIRO, E. S. Comparação entre dados altimétricos Shuttle Radar Topography Mission, cartas topográficas e GPS: numa área com relevo escarpado. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 58, n. 1, p. 1-9, 2006.
- QUINN, P. F.; BEVEN, K. J.; CHEVALLIER, P.; PLANCHON, O. The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using digital terrain models. **Hydrological Processes**, v. 5, p. 59-79, 1991.
- RABUS, B.; EINEDER, M.; ROTH, A.; BAMLER, R. The shuttle radar topography mission: a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, v.57, p. 241- 262, 2003.
- 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**. Washington, USDA, 1997. 384p.
- RODRÍGUEZ, E.; MORRIS, C. S.; BELZ, J. E. A global assessment of the SRTM performance. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 72, n. 3, p. 249-260, 2006
- ROMPAEY, A. V.; BAZZOFFI, P.; JONES, R. J. A.; MONTANARELLA, L. Modelling sediment yields in Italian catchments. **Geomorphology**, v. 65, n. 1-2, p. 157-169, 2005.
- SALGADO, M. P. G.; FORMAGGIO, A. R.; RUDORFF, B. F. T. Refinement of the digital elevation model applied to erosion modeling of watersheds. **Geografia**, v. 36, p. 201-211, 2011.
- SANTOS, P. R. A.; GABOARDI, C.; OLIVEIRA, L. C. Avaliação da precisão vertical dos modelos SRTM para a Amazônia. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 58, n. 01, p. 101-107, 2006.
- SHINDE, V.; SHARMA, A.; TIWARI, K. N.; SINGH, M. Quantitative determination of soil erosion and prioritization of micro-watersheds using remote sensing and GIS. **J Indian Soc Remote Sens**, v. 39, p. 1-12, 2011.
- VALERIANO, M. M.; KUPLICH, T. M.; STORINO, M.; AMARAL, B. D.; MENDES JR., J. N.; LIMA, D. J. Modeling small watersheds in Brazilian Amazonia with shuttle radar topographic mission-90m data. **Computers & Geosciences**, v. 32, p. 1169-1181, 2006.
- VAN OOST, K.; GOVERS, G.; DESMET, P. Evaluating the effects of changes in landscape structure on soil erosion by water and tillage. **Landscape Ecology**, v. 15, p. 577-589, 2000.
- VERSTRAETEN, G. Regional scale modelling of hillslope sediment delivery with SRTM elevation data. **Geomorphology**, v. 81, p. 128-140, 2006.
- VRIELING, A. Satellite remote sensing for water assessment: a review. **Catena**, v. 65, p. 2-18, 2006.
- WARREN, S. D.; MITASOVA, H.; HOHMANN, M. G.; LANDSBERGER, S.; ISKANDER, F. Y.; RUZYCKI, T. S.; SENSEMAN, G. M. Validation of a 3-D enhancement of the Universal Soil Loss Equation for prediction of soil erosion and sediment deposition. **Catena**, v. 64, p. 281-296, 2005.
- WILLIAMS, J. R. **Sediment yield prediction with universal equation using runoff energy factor**. Washington, USDA, 1975. p. 244-252. (ARS-S-40).
- WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. **Predicting rainfall erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains: guide for selection of practices for soil and water conservation**. Washington, USDA, 1965. 47p.
- WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. **Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning**. Washington, USDA, 1978. 58p.
- WISE, S. M. Assessing the quality for hydrological applications of digital elevation models derived from contours. **Hydrological Processes**, v.14, p.1909-1929, 2000.
- WISE, S. M. Effect of differing DEM creation methods on the results from a hydrological model.

**Computers & Geosciences**, v. 33, p. 1351-1365, 2007.

YANG, C. T. Unit stream power and sediment transport. **Journal of the Hydraulics Division**, v. 98, n. 10, p. 1805-1826, 1972.

YANG, C. T. Unit stream power equation for Gravel. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 110, n. 12, p. 1783-1797, 1984.

ZEVENBERGEN, L. W.; THORNE, C. R. Quantitative analysis of land surface topography. **Earth Surface Processes Landforms**, v. 12, p. 47-56, 1987.