

## **Influência do espaçamento celular do modelo digital de elevação no cálculo do fator topográfico bidimensional da Equação Universal de Perdas de Solo**

Moisés Pereira Galvão Salgado <sup>1</sup>  
Antonio Roberto Formaggio <sup>2</sup>  
Bernardo Friedrich Theodor Rudorff <sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE  
Av. dos Astronautas, 1758 - Caixa Postal 515  
12201-970 - São José dos Campos - SP, Brasil  
salgado@dsr.inpe.br

**Resumo.** O fator topográfico bidimensional (LS-2d) é calculado com base no provável percurso traçado pelo fluxo da água sobre as células do modelo digital de elevação (MDE). O cálculo do fator LS-2d permite identificar áreas vulneráveis à erosão hídrica em função das características do relevo de uma bacia hidrográfica. O presente artigo objetivou avaliar a influência do espaçamento celular do MDE no cálculo do fator LS-2d e as implicações do refinamento do MDE para o cálculo do fator LS-2d utilizando como área de estudo a microbacia do Córrego do Veado, MS. Foram utilizados os dados SRTM para modelar o relevo da microbacia. Além destes, os dados TOPODATA e outros três MDE (com espaçamento celular de 60m, 45m e 30m) gerados por meio da interpolação dos dados SRTM foram utilizados para o cálculo do fator topográfico bidimensional por meio do aplicativo USLE-2D. Observou-se que o refinamento dos dados SRTM (visando o cálculo do fator LS-2d) pode influenciar na identificação das áreas mais susceptíveis aos processos erosivos. A análise dos resultados indicou que o refinamento do MDE SRTM e a consequente redução do espaçamento celular favoreceram a diminuição da frequência de valores elevados do fator LS-2d. Verificou-se que o refinamento do MDE SRTM conduziu à redução dos valores locais e também da média geral do fator LS-2d. Desta forma, o MDE SRTM apresentou a melhor condição para a identificação (de modo generalizado) das regiões com características topográficas favoráveis à erosão hídrica na microbacia do Córrego do Veado.

**Palavras-chave:** USLE-2D, modelagem da erosão, geoprocessamento, geoestatística.

**Abstract:** The two-dimensional topographic factor (LS-2d) is calculated based on the probable path of the modeled water flow on the cells of the digital elevation model (DEM). The LS-2d factor calculation allows to identify areas vulnerable to erosion in function of a watershed relief form characteristics. We aimed to evaluate the cell spacing influence in the calculation of the LS-2d factor and the implications of the DEM's refinement for the calculation of the LS-2d factor in a watershed located on Mato Grosso do Sul, Brazil. SRTM data were used to model the relief of the study area. Furthermore, TOPODATA data and three other DEMs (with cell spacing of 60m, 45m and 30m) generated by interpolation of the SRTM data were used to calculate the two-dimensional topographic factor using the USLE-2D software. We observed that the refinement of SRTM data (in order to calculate the LS-2d factor) may influence the identification of the area most susceptible to erosion. The results indicated that the refinement of SRTM data and consequent minor cell spacing, helped reduce the frequency of elevated values of factor LS-2d. We concluded that the refinement of SRTM data led to the reduction of local values and also of the global mean of the LS-2d factor, so the SRTM DEM achieved the best condition for the identification of areas with erosion potential.

**Key-words:** USLE-2D, erosion modeling, GIS, geostatistics, kriging.

## 1. Introdução

A Equação Universal de Perdas de Solo (*Universal Soil Loss Equation* - USLE) proposta por Wischmeier e Smith (1978) é um modelo empírico para estimar as perdas de solo de uma determinada área, originalmente um talhão agrícola, causadas pela erosão hídrica.

Atualmente, com o advento dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG), a USLE vem sendo aplicada em grandes áreas e, entretanto, a concepção original do modelo não considera as interações entre o fluxo do escoamento superficial (agente erosivo) e as diversas formas de relevo que constituem uma bacia hidrográfica.

O modelo USLE é descrito pela equação  $A=R.K.L.S.C.P.$ , onde 'A' equivale à quantidade média de solo perdida em determinada área durante um período de tempo. 'R' é o fator de erosividade da chuva, 'K' representa a erodibilidade do solo, 'LS' corresponde ao fator topográfico, 'C' e 'P' são, respectivamente, os fatores que consideram a cobertura vegetal e as práticas de conservação do solo.

Diversos trabalhos empregam o modelo USLE para avaliar as perdas de solo em bacias hidrográficas. Entretanto a utilização da concepção original do modelo para o cálculo das variáveis topográficas (comprimento de rampa 'L' e declividade 'S') não está adaptada a esta finalidade. Desta forma, os valores de perda de solo estimados pela USLE não podem ser avaliados em termos quantitativos, devendo ser utilizados cautelosamente para fins comparativos como meio de análise qualitativa da distribuição espacial da erosão hídrica potencial de uma bacia hidrográfica.

Galdino *et al.* (2006) utilizaram os fatores 'R', 'K' e 'LS', ou seja, os fatores relacionados ao meio físico considerados na USLE, para avaliar a erosão laminar hídrica potencial na bacia do Alto Taquari, região produtora dos sedimentos depositados na planície do Pantanal. Fornelos e Neves (2006) empregaram uma metodologia para o cálculo do fator topográfico 'LS', com base no modelo digital de elevação (MDE) *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), enquanto Ruhoff (2006) utilizou um método baseado no mapa de distâncias entre os divisores de água e a rede de drenagem para estimar os valores de 'LS'. Entretanto, as metodologias para o cálculo do fator topográfico citadas não consideram a influência da estrutura do relevo no processo erosivo.

O aplicativo USLE-2D desenvolvido por Desmet e Goovers (1996a) para calcular o fator topográfico bidimensional (LS-2d), considera o percurso do fluxo do escoamento superficial para a determinação do comprimento de rampa (L). Este método baseia-se na estrutura de vizinhança das células do MDE para estimar o percurso do fluxo do

escoamento superficial na bacia hidrográfica, conforme apresentado por Desmet e Goovers (1996b), indicando as áreas mais suscetíveis à erosão hídrica. Desta forma, a estrutura do relevo descrita pelo MDE pode influenciar no cálculo do fator topográfico, tornando-o maior em regiões onde ocorre a concentração do fluxo da água. Esta abordagem permite a identificação das áreas vulneráveis aos processos erosivos em função das características do relevo da bacia hidrográfica.

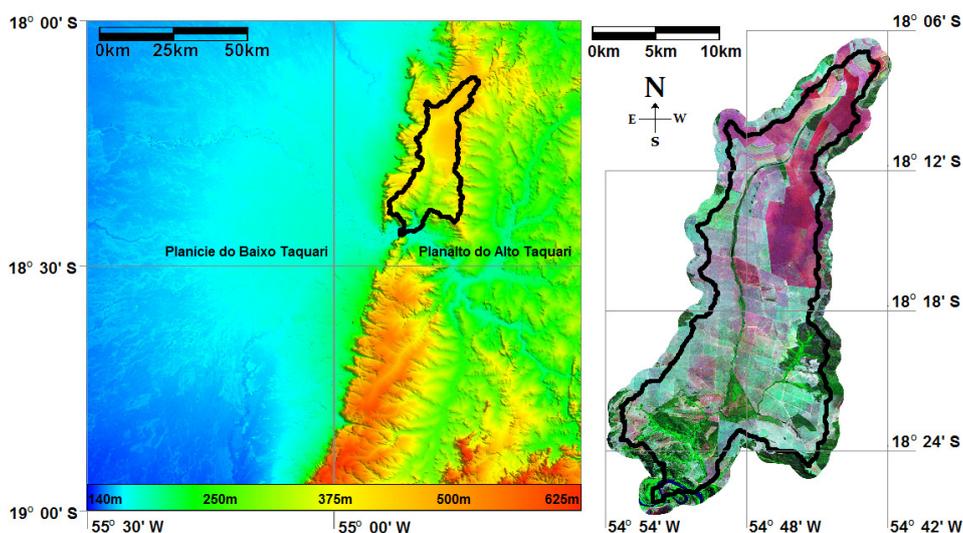
Kinnel (2001) ressalta a importância do uso do fator topográfico bidimensional, calculado com base nas características hidrológicas da área de estudo, para avaliação da erosão em bacias hidrográficas. Verstraeten (2006) utilizou o algoritmo USLE-2D com base nos dados SRTM para estimar as perdas de solo em uma bacia hidrográfica. Lopes *et al.* (2007) utilizaram o método USLE-2D para identificar áreas com potencial de fornecimento de fósforo de ecossistemas terrestres para os corpos d'água. Assim sendo, para aprimorar a avaliação da distribuição espacial dos processos erosivos em bacias hidrográficas, é necessário conhecer de que modo as características do modelo digital de elevação podem influenciar no cálculo do fator topográfico bidimensional.

## 2. Objetivo

O presente trabalho objetivou avaliar a influência do espaçamento celular do modelo digital de elevação no cálculo do fator topográfico bidimensional, utilizado para a aplicação da USLE em bacias hidrográficas, tendo-se buscado verificar as implicações decorrentes do refinamento do MDE (redução do espaçamento celular) para o cálculo do fator LS-2d em uma microbacia hidrográfica experimental.

## 3. Material e Métodos

A área de estudo, ilustrada na **Figura 1**, corresponde à microbacia do Córrego do Veado, localizada no município de Coxim, MS. A microbacia do Córrego do Veado está situada na bacia hidrográfica do Alto Taquari e possui o código 895634 conforme a classificação por Ottobacias adotada pelo Sistema Nacional de Recursos Hídricos.



**Figura 1.** Representação do limite da microbacia do Córrego do Veado sobre o modelo digital de elevação SRTM e ampliação (à direita) sobre o mosaico Landsat Geocover 2000.

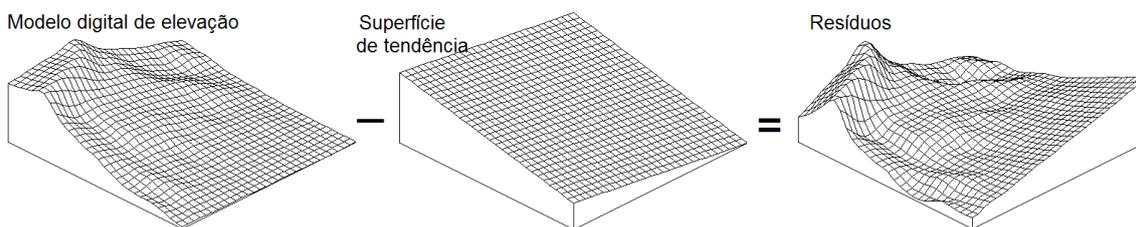
O relevo da microbacia é caracterizado por colinas médias de topos convexos e trechos com colinas de topos planos e amplos. Nas transições de estruturas geológicas ocorrem pequenas escarpas ou rupturas topográficas abruptas, em que a dissecação do relevo torna-se mais acentuada. O uso do solo predominante na microbacia é a agropecuária, conforme ilustrado na Figura 1.

Os dados SRTM (estruturados em uma grade regular com células medindo aproximadamente 90m x 90m) disponibilizados pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), Miranda (2005) e os dados TOPODATA (com células medindo aproximadamente 30m x 30m) apresentados por Valeriano (2005) foram utilizados para a representação do relevo, ambos compatíveis com a carta do IBGE SE-21-Z-B (escala 1:250.000) e disponibilizados gratuitamente na internet. A folha S-21-15\_2000 do mosaico Landsat Geocover 2000 foi utilizada para representação do uso do solo predominante na microbacia do Córrego do Veado.

Os dados SRTM foram interpolados utilizando a Krigagem ordinária de acordo com a metodologia proposta por Valeriano (2008). Foram gerados três MDE com células medindo aproximadamente 60m x 60m, 45m x 45m e 30m x 30m de modo a avaliar de que maneira o espaçamento celular do MDE pode influenciar no cálculo da variável fator topográfico bidimensional.

Visando o processo de interpolação, recortou-se a grade do MDE SRTM utilizando uma margem (*Buffer*) de mil metros a partir do limite da microbacia. Os dados SRTM foram transformados em pontos cotados utilizando a ferramenta *RASTERVECTOR* do aplicativo *Idrisi* Eastman (2006), passando da estrutura matricial para a estrutura vetorial de dados, e em seguida exportados em um arquivo de texto (.dat) contendo as coordenadas geográficas (longitude e latitude) e a cota (altitude) dos pontos.

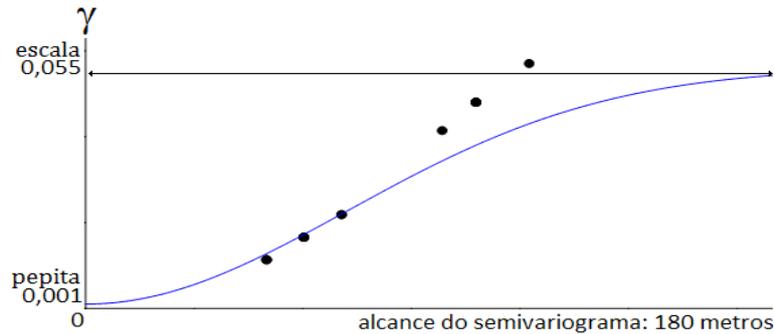
Utilizando o aplicativo *Surfer* 9.1 (Golden Software, 2009), foi gerado o semivariograma experimental com base nos resíduos dos pontos, conforme ilustrado na Figura 2, extraídos por meio da remoção da tendência dos dados contidos no arquivo de texto exportado. O semivariograma foi escalonado considerando-se a variância máxima dos dados, de modo que o patamar encontra-se em torno do valor 1 no eixo y. Conforme Valeriano (2008) o escalonamento (*standardized semivariogram*) favorece a comparação entre semivariogramas com diferentes ordens de grandeza e a remoção da tendência visa atender à premissa da geoestatística de estacionariedade, que requer que as características estatísticas sejam constantes por toda a área analisada.



**Figura 2.** Representação do processo de obtenção dos resíduos a partir da diferença entre os dados originais do modelo digital de elevação e a superfície de tendência dos dados.

A interpolação dos dados SRTM foi realizada utilizando a ferramenta *Grid* (*Kriging*) do aplicativo *Surfer*, selecionando o modelo gaussiano de semivariograma, com alcance de 180 metros (0,0017 *arc degrees*), escala de variação e efeito pepita de 0,055 e 0,001 respectivamente. Estes coeficientes geoestatísticos foram utilizados para a interpolação dos três MDE gerados a partir dos dados SRTM, com diferentes tamanhos de células (60m x 60m, 45m x 45m e 30m x 30m). O modelo teórico de semivariograma omnidirecional

gaussiano foi ajustado com base nos resíduos extraídos dos dados SRTM, priorizando a estrutura de variação inicial dos dados. O modelo de semivariograma utilizado e os coeficientes selecionados para a Krigagem ordinária são apresentados na Figura 3.



**Figura 3.** Modelo de semivariograma gaussiano ajustado aos resíduos dos dados SRTM da microbacia do Córrego do Veado, MS.

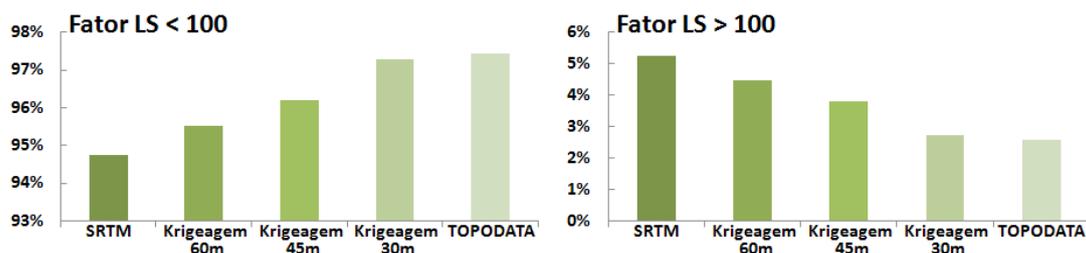
Após a geração dos MDE interpolados a partir dos dados SRTM (Krigagem 60m, 45m e 30m), foi utilizado o aplicativo *Idrisi* para importar os MDE analisados (SRTM, Krigagem 60m, 45m, 30m e TOPODATA) de modo a compatibilizar o formato de arquivo dos MDE com o aplicativo utilizado para calcular o fator topográfico bidimensional.

O aplicativo USLE-2D foi utilizado para estimar o percurso do fluxo superficial e o fator topográfico bidimensional com base na estrutura de vizinhança das células dos MDE. O percurso do fluxo do escoamento superficial foi calculado por meio do algoritmo *Flux Decomposition* e o fator topográfico bidimensional foi estimado utilizando a função proposta por Nearing (1997) com base nas equações apresentadas em McCool *et al.* (1987; 1989).

Os resultados foram comparados por meio de análises visuais das grades geradas, análise das distribuições dos valores e análise de regressão dos valores do fator topográfico calculado com base nos MDE interpolados (Krigagem 60m, 45m, 30 e TOPODATA), em relação aos valores calculados a partir dos dados SRTM originais. A análise de regressão foi realizada com base em 575 pontos (coordenadas geográficas) amostrados aleatoriamente dentro do limite da área de estudo.

#### 4. Resultados e Discussão

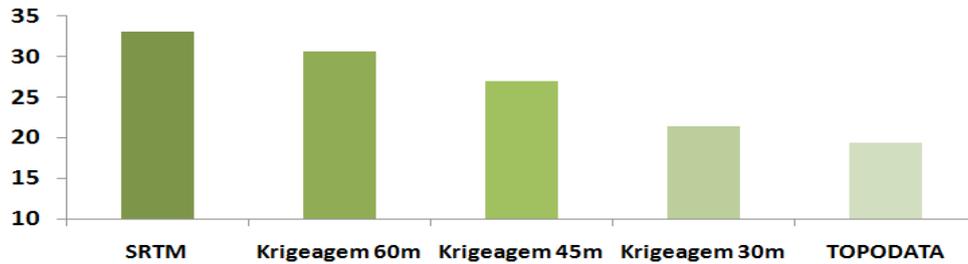
Observando-se a Figura 4 nota-se que o MDE TOPODATA, com espaçamento celular de 30m, apresentou a maior frequência (97,4%) de valores de LS-2d menores que 100, enquanto que o MDE SRTM, com espaçamento celular de 90m, apresentou a maior frequência (5,25%) de valores de LS-2d acima de 100.



**Figura 4.** Frequências relativas de valores do fator topográfico bidimensional, calculados

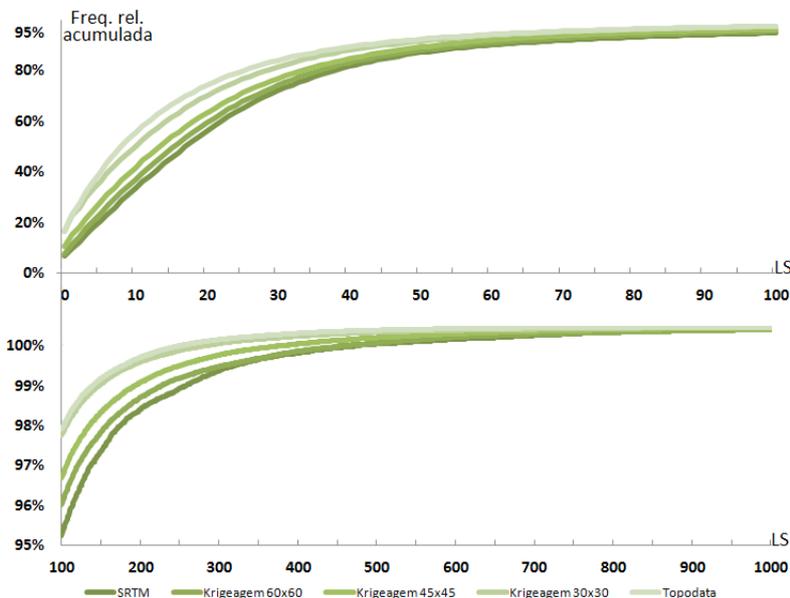
com base nos MDE da área de estudo analisados.

As diferenças observadas entre os resultados obtidos com base no MDE TOPODATA e no MDE Krigeagem 30m podem ser justificadas pela seleção de diferentes coeficientes geoestatísticos empregados na interpolação destes MDE. Verificando as distribuições de valores do fator LS-2d calculadas com base nos MDE analisados, notou-se que o refinamento dos dados SRTM e a conseqüente redução do espaçamento celular do MDE conduziram à redução da média geral do fator LS-2d. Ver Figura 5.



**Figura 5.** Comparação das médias totais dos valores de fator topográfico bidimensional, calculadas com base nas grades geradas a partir dos MDE da área de estudo analisados.

As frequências de valores de LS-2d, observadas na Figura 4, podem justificar as diferenças entre as médias apresentadas na Figura 5. Pode-se notar que a redução do espaçamento celular do MDE resultou na diminuição da frequência dos maiores valores de LS-2d. Conseqüentemente, os MDE com menores tamanhos de célula apresentaram um aumento da frequência de valores menores do fator LS-2d. A frequência relativa acumulada permitiu analisar, de modo contínuo, como ocorreu a distribuição dos valores de LS-2d. Os gráficos apresentados na Figura 6 permitem analisar a distribuição da frequência relativa acumulada dos valores de LS-2d calculados com base nos MDE avaliados.

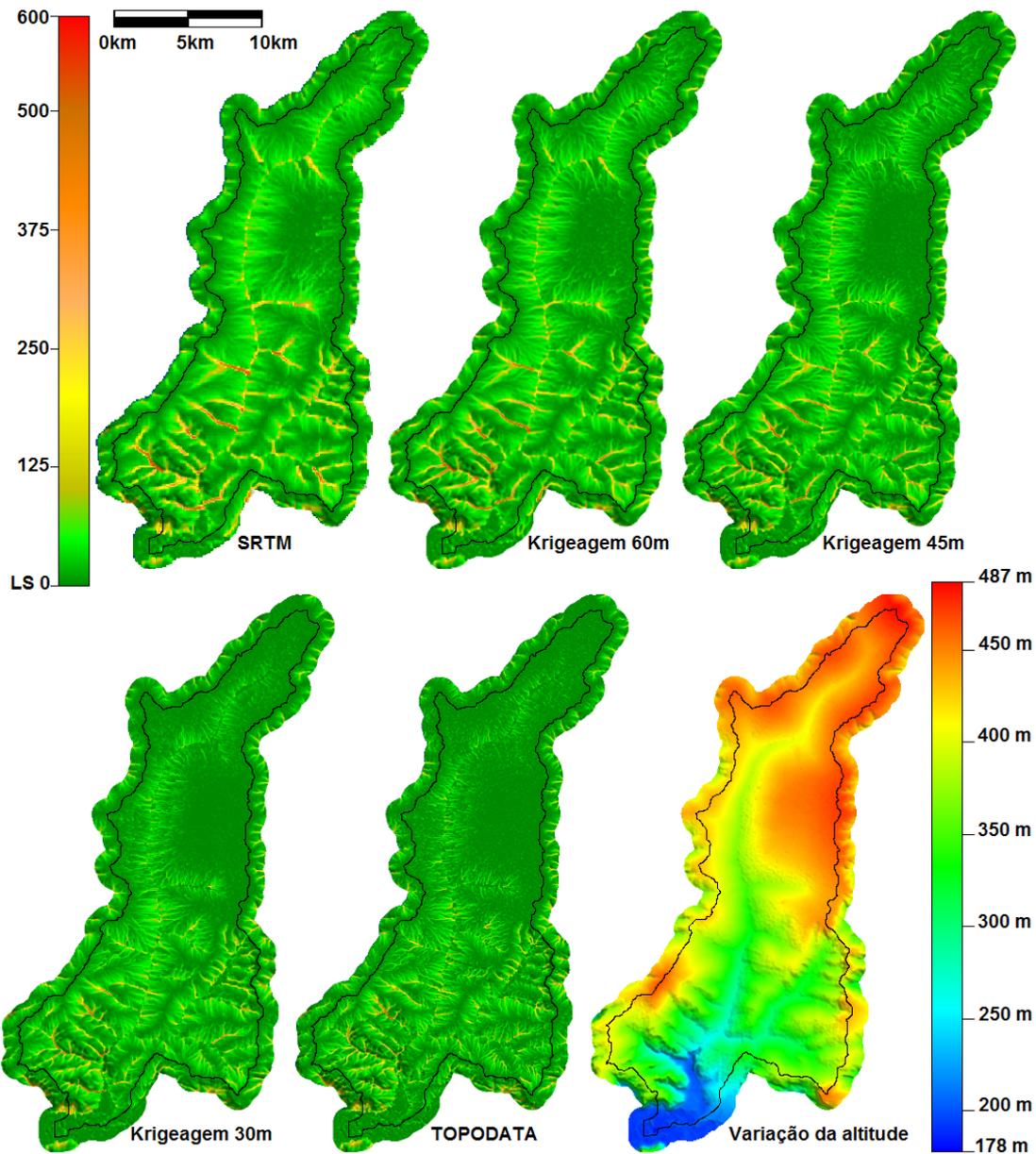


**Figura 6.** Representação da frequência relativa acumulada dos valores do fator topográfico calculado com base nos modelos digitais de elevação.

Analisando a Figura 6 verifica-se que quanto maior o espaçamento celular do MDE, maior é a frequência de valores elevados de LS-2d. Ou seja, o refinamento dos dados

SRTM e a conseqüente redução do espaçamento celular dos MDE contribuíram para a redução da frequência de valores elevados do fator LS-2d. Desta forma, o refinamento do MDE SRTM visando o cálculo do fator topográfico bidimensional pode dificultar a identificação de áreas susceptíveis aos processos erosivos.

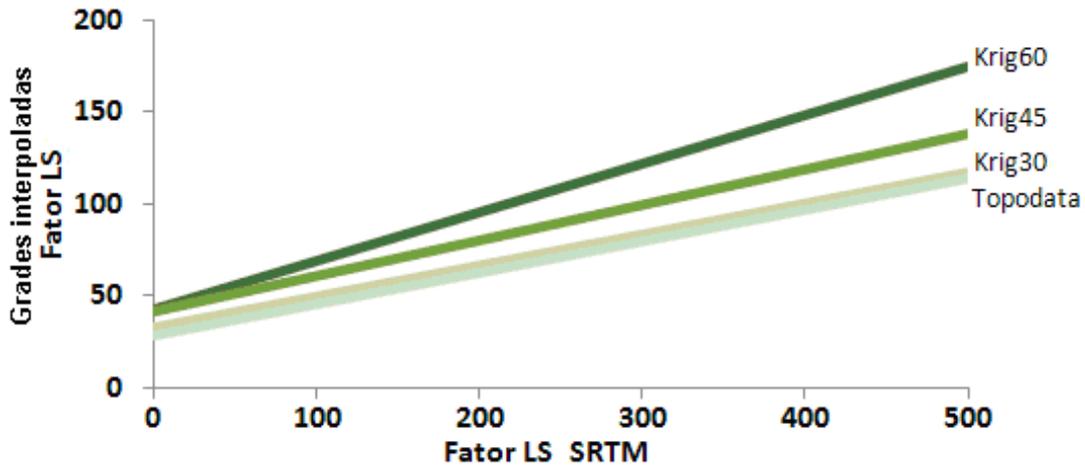
A distribuição espacial do fator LS-2d, representada na Figura 7, confirma os resultados verificados nas análises das distribuições de valores apresentadas anteriormente. Observando a Figura 7, pode-se notar que o fator topográfico bidimensional calculado com base no MDE SRTM resultou em valores de LS-2d maiores que os obtidos a partir dos MDE refinados (com espaçamento celular menor que 90 metros).



**Figura 7.** Representação da variação altimétrica e da distribuição espacial do fator topográfico bidimensional calculado a partir dos dados SRTM originais, dos três MDE interpolados usando a Krigeagem (60m, 45m e 30m) e dos dados TOPODATA.

As linhas de tendência resultantes da análise de regressão, realizada com base na amostragem das grades do fator LS-2d, apresentam o comportamento associado à variação

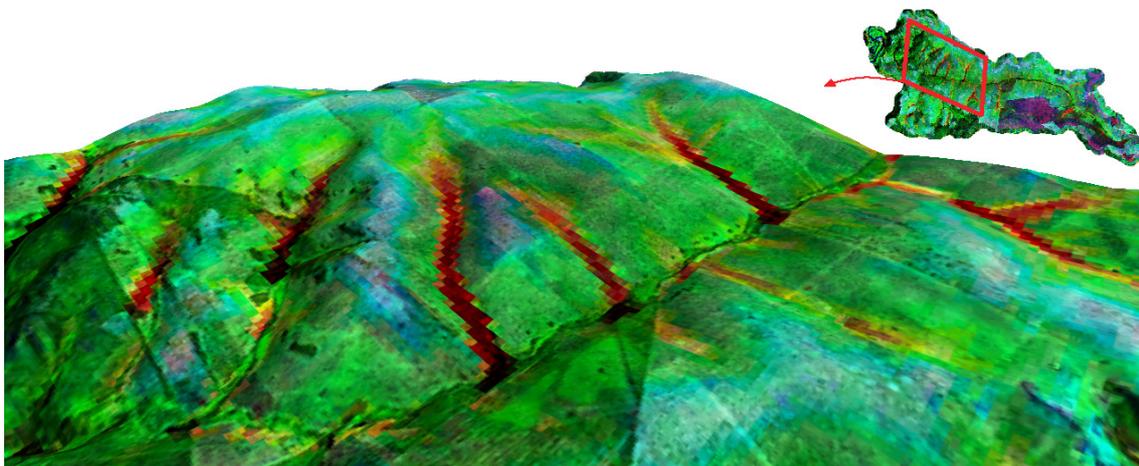
local dos valores em função do espaçamento celular do modelo. A Figura 8 representa a tendência de redução dos valores de LS-2d em função da diminuição do espaçamento celular.



**Figura 8.** Linhas de tendência geradas a partir da regressão linear da variável fator topográfico bidimensional, calculada com base nas grades interpoladas, em relação aos valores calculados a partir dos dados SRTM.

Nota-se que o refinamento dos dados SRTM levou a uma menor frequência dos maiores valores de LS-2d, porém verificou-se a ocorrência dos maiores valores de LS-2d nos resultados obtidos com base nos MDE com espaçamento celular refinados. Desta forma, o valor máximo de LS-2d obtido por meio do MDE SRTM foi de 2023 enquanto que pelo MDE TOPODATA foi de 2633.

Pode-se notar que o espaçamento celular original dos dados SRTM (aproximadamente 90m) contribuiu para a generalização das áreas com características potenciais à erosão hídrica, conforme ilustrado na Figura 9, favorecendo a identificação das áreas que necessitam de cobertura vegetal e práticas de conservação do solo adequadas.



**Figura 9.** Representação das áreas mais suscetíveis à erosão hídrica, por meio do modelo digital de elevação SRTM sobreposto pelo mosaico Landsat Geocover 2000 e pelo resultado do cálculo do fator topográfico bidimensional, em uma região da microbacia do Córrego do Veado.

Observou-se que a redução do espaçamento celular do MDE contribuiu para a

diminuição da média local de LS-2d. Entretanto os MDE refinados beneficiaram a ocorrência de algumas células com valores extremos de LS-2d. Os MDE gerados por meio do refinamento dos dados SRTM favoreceram a restrição de células que indicam áreas susceptíveis à erosão. Deste modo, o espaçamento celular original do MDE SRTM apresentou maior potencial para identificação (de modo abrangente) das áreas com características mais susceptíveis aos processos erosivos.

## 5. Conclusões

O presente trabalho avaliou a influência do espaçamento celular do modelo digital de elevação no cálculo do fator topográfico bidimensional e as implicações advindas do refinamento do MDE visando o cálculo do fator LS-2d na microbacia hidrográfica do Córrego do Veado, MS. Analisando as distribuições de valores do fator topográfico bidimensional pode-se verificar que o espaçamento celular dos MDE influenciou nas distribuições dos valores resultantes. Concluiu-se que o refinamento do MDE e a consequente redução do espaçamento celular influenciaram nos resultados do cálculo do fator topográfico bidimensional, indicando a redução dos valores de LS-2d calculados com base nos MDE refinados. Deste modo, o MDE SRTM apresentou a maior ocorrência de valores elevados de LS-2d e possibilitou uma identificação mais abrangente das áreas com potencial à erosão hídrica na microbacia do Córrego do Veado.

## 6. Referências

- 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, 1996a.
- Desmet, P.J.J.; Govers, G. Comparison of routing systems for DEMs and their implications for predicting ephemeral gullies. **International Journal of Geographical Information Systems**, v. 10, n.3, p. 311-331, 1996b.
- Eastman, J. R. **IDRISI Andes**: guide to GIS and Image processing. Versão 15 (Andes). Worcester: Clark University, 2006. 328 p.
- Miranda, E. E. (Coord.). **Brasil em Relevô**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2005. Disponível em: <<http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br>>. Acesso em: 23 ago. 2009.
- Fornelos, L. F.; Neves, S. M. A. S. Uso de modelos digitais de elevação (MDE) gerados a partir de imagens de radar interferométrico (SRTM) na estimativa de perda de solo. In: Simpósio de Geotecnologias no Pantanal, 1., 2006, Campo Grande, MS. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2006. p. 182-191.
- Galdino, S.; Rizzo, A.; Soriano, B. M. A.; Vieira, L. M.; Padovani, C. R. Potencial erosivo da Bacia do Alto Taquari. In: Galdino, S.; Vieira, L. M.; Pellegrin, L. A (Ed.). **Impactos ambientais e socioeconômicos na bacia do rio Taquari – Pantanal**. Corumbá: EMBRAPA, 2006. 356p.
- Golden Software Inc. **Surface Mapping System**. Versão 9.1. Golden: Golden Software, Inc. 2009.
- Kinnel, P. I. A. Slope length factor for applying the USLE-M to erosion in grid cells. **Soil & Tillage Research**, v. 58, p. 11-17, 2001.
- Lopes, F.; Merten, G. H.; Franzen, M.; Giasson, E.; Helfer, F. Cybis, L. F. A. Utilização de P-Index em uma bacia hidrográfica através de técnicas de geoprocessamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.11, n.3, p. 312-317, 2007.
- McCool, D.K.; Brown, L.C.; Foster, G.R.; Mutchler, C.K.; Meyer, L.D. Revised slope steepness factor for the Universal Soil Loss Equation. **Transactions of the ASAE**, v. 30, n. 5, p.1387-1396, 1987.
- 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, n. 5, p. 1571-1576, 1989.

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.

Ruhoff, A. L. Avaliação dos processos erosivos na bacia do Arroio Grande, RS, através da equação universal de perdas de solos. In: Simpósio de Geotecnologias no Pantanal, 1., 2006, Campo Grande, MS. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2006. p. 229-238.

Valeriano, M. M. Modelo digital de variáveis morfométricas com dados SRTM para o território nacional: o projeto TOPODATA. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 12., 2005, Goiânia, GO. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005. p. 3595-3602.

Valeriano, M. M. **TOPODATA**: Seleção de coeficientes geoestatísticos para o refinamento unificado de dados SRTM. São José dos Campos: INPE, 2008. 50 p.

Verstraeten, G. Regional scale modelling of hillslope sediment delivery with SRTM elevation data. **Geomorphology**, v. 81, p. 128-140, 2006.

Wischmeier, W.H.; Smith, D.D. **Predicting rainfall erosion losses**: a guide to conservation planning. Washington: USDA, 1978. 58p. (Agriculture Handbook, 537)