

# Mapeamento do comprimento de rampa em microbacias com Sistema de Informação Geográfica

**Márcio de Morisson Valeriano**

*Instituto Agronômico de Campinas, Campinas, São Paulo, Brasil. E-mail: valerian@iac.br*

**RESUMO.** São apresentados procedimentos para a geração de imagens de comprimento de rampa em microbacias por Sistemas de Informação Geográfica (SIG). Os métodos de geoprocessamento foram avaliados com análises de regressão entre os resultados digitais e um conjunto de dados cartográficos medidos manualmente numa grade regular de 200 m de espaçamento, sobre toda a área da microbacia do córrego São Joaquim (Pirassununga, Estado de São Paulo). A função de análise de custos anisotrópicos do SIG foi adaptada para modelar o comprimento de rampa, explorando-se a semelhança dos conceitos e a analogia entre seus elementos e feições topográficas. Os passos de extração desses elementos do Modelo Digital de Elevação (DEM), divisores, direção de rampa, força de rampa e distância unitária, assim como todos os procedimentos desenvolvidos, foram programados em um arquivo de linguagem específica do SIG usado. A ocorrência de erros nas determinações de comprimento de rampa prevaleceu em áreas de relevo acidentado com declividades altas e rampas curtas, o que indica a necessidade de se estabelecerem procedimentos mais sofisticados de ajuste para os resultados de SIG.

**Palavras-chave:** geoprocessamento, MDT/MDE, comprimento de rampa, microbacia.

**ABSTRACT. Watershed slope length mapping with Geographical Information System.** Procedures for the generation of slope length images by geographical information systems (GIS) are presented. The geoprocessing methods were evaluated through regression analyses of the digital results with a cartographically hand-measured data set, measured in a regular grid of 200m spacing, covering São Joaquim watershed (Pirassununga, SP). Anisotropic cost analysis function of SIG was adapted to model the slope length, by exploring the conceptual similarity and the analogy between its elements and topographic features. The extraction steps of the images from the Digital Elevation Model (DEM), hilltops, slope direction, slope force and unitary distance, as well as the whole developed procedures, were programmed in an internal file of the specific GIS language. Errors in the slope length estimation were shown to prevail in areas of steep relief, with high slope angles and short slopes, which suggest the need of research for the establishment of adequate fit techniques for GIS functions.

**Key words:** geoprocessing, DTM/DEM, slope length, watershed.

## Introdução

Muitos trabalhos de planejamento territorial usando Sistemas de Informação Geográfica (SIG) abordam o risco de erosão como atributo numérico do tipo ordinal, pelos quais se ordenam classes de risco, ou outro atributo. Em geral, parte-se de atributos numéricos proporcionais (valores contínuos de declividade, profundidade do solo, fertilidade, por exemplo) estruturados em imagens digitais, conhecidas por Planos de Informação (PI) e estabelecem-se classes que serão operadas mediante comparações entre categorias ordenadas do tipo

“alto-médio-baixo”. Mesmo entre aqueles trabalhos em SIG lidando exclusivamente com modelagem numérica, observa-se esta tendência. Entretanto, para se poder avaliar o potencial e as limitações de tais aplicações de modelos do meio físico, é necessário, entre outros avanços, experimentar o tratamento de dados em superfícies numéricas contínuas, sem o armazenamento em classes discretas.

A obtenção de variáveis topográficas para a modelagem de perda de solos é um problema tratado geralmente dentro de um trabalho maior de integração de dados, quando o enfoque não permite que se concentrem maiores esforços para sua

compreensão. Entretanto, para variáveis atendidas pelos recursos de SIG, fatores ligados às opções de operação influenciam os resultados do cálculo, demandando-se cuidados de procedimento. Para outras variáveis, como o comprimento de rampa, é oportuno, ainda, que se aprimorem os métodos de levantamento e que se desenvolvam alternativas automáticas de obtenção. A aplicação prática do geoprocessamento de tais modelos, com efeito, permanece comprometida enquanto não forem realizadas pesquisas no sentido de otimizar os procedimentos de tratamento dos dados. Em estudo comparativo entre métodos lógicos e analíticos de avaliação e risco de erosão, Ranieri *et al.* (1998) apontam, como principal fator afetando a escolha dos métodos, a pouca confiabilidade dos métodos analíticos, atribuído pelos autores à escassez de pesquisa com os métodos de obtenção das variáveis dos modelos, sobretudo o comprimento de rampa.

O comprimento de rampa não dispõe de aplicativos específicos para sua obtenção devido, em parte, à pouca importância tradicionalmente atribuída ao dado (Zachar, 1982) e também às complexas funções de conectividade implícitas em seu conceito. Os trabalhos de modelagem da perda de solos em microbacias por geoprocessamento empregam freqüentemente a simples atribuição de um valor único de comprimento de rampa, calculado a partir da densidade de drenagem (Molnár e Julien, 1998), ou a inserção em SIG dos dados levantados manualmente por análise cartográfica (Ferrari e Hiruma, 1996). Recentemente, técnicas digitais para o mapeamento do comprimento de rampa (Desmet e Govers, 1996; Rocha *et al.*, 1996; Valeriano, 1999; Kinnel, 2001) a partir do Modelo Digital de Elevação (MDE) têm sido apresentadas. Desmet e Govers (1996) apresentaram um método de obtenção, deterministicamente elaborado com base na área de confluência para cada ponto observado, com um programa FORTRAN, que recebe e fornece imagens compatíveis com SIG. Apesar da concepção sofisticada, para a variável comprimento de rampa em particular, os resultados digitais não foram bem correlacionados com o respectivo controle manual ( $r^2=0,30$ , no melhor caso). Kinnel (2001) adaptou a metodologia de Desmet e Govers (1996) para um cálculo modificado da erosão, para situações sem limitações ao transporte de sedimentos. No trabalho de Rocha *et al.* (1996), os autores desenvolveram uma seqüência metodológica de aplicações em SIG sobre o MDE resultando num PI de comprimento de rampa em estrutura poligonal.

Castro e Valério Filho (1997) aplicaram outro procedimento automático sobre o MDE para a determinação do PI comprimento de rampa. Apesar de obter o resultado em classes de comprimento de rampa, o princípio de obtenção assemelha-se às características inerentes à variável. Os autores indicam que foi utilizado um cruzamento entre os PI de orientação das vertentes e de distância relativa a canais de drenagem.

Uma vez que o comprimento de rampa depende da posição do ponto estudado sobre as estruturas da topografia, pode-se abordar a variável sob o ponto de vista de funções de conectividade. Operações de conectividade são aquelas que estimam valores, quantitativos ou qualitativos, pela sua acumulação através de uma área. Para o cálculo de uma função de conectividade, deve-se especificar as condições em que os elementos são interligados e o controle do movimento entre os elementos espaciais. As funções de conectividade se agrupam em funções de contigüidade, proximidade, fluxo em redes e funções de espalhamento (Valenzuela, 1991), as duas últimas de interesse potencial para mapeamento do comprimento de rampa.

Análises de fluxo em redes tratam do transporte de recursos de uma localidade a outra. O SIG pode ser empregado para executar uma análise de fluxos de modo a determinar, por exemplo, o transporte de água e sedimentos em uma rede fluvial; a otimização de serviços de transportes ou de coleta/entrega em malha viária urbana; alocação de recursos: subdivisão do município para distribuição de escolas e hospitais. Análises de fluxo normalmente usam quatro componentes: um conjunto de recursos (ex. solo); a disposição espacial deste(s) recurso(s); um destino (ex. rede de drenagem); e um conjunto de regras controlando o transporte (ex. topografia, cobertura vegetal, clima etc.).

As análises de funções de espalhamento, também chamadas de análise de custos, têm características das funções de proximidade e fluxo em rede, e avaliam fenômenos que se acumulam com a distância através de uma área heterogênea, de superfície complexa. Exemplos são o cálculo do custo de construção de linha telefônica de um tronco existente para todos os locais da área de interesse; cálculo do tempo gasto em percurso através de terreno relativamente acidentado. Os movimentos podem ser controlados por barreiras parciais, que alteram a taxa de movimento ou por barreiras absolutas, que impedem totalmente o movimento.

Funções de análise de fluxo em rede e espalhamento foram recentemente incorporadas a sub-rotinas de SIG (Eastman, 1995), sob o nome de

funções de custo, que são oferecidas em diferentes modalidades. Para o caso de análises de fluxo em redes, a função é referida como custo anisotrópico, devido à heterogeneidade da área atuando no controle do fluxo. Referida como dispersão, a análise de espalhamento modela o movimento do recurso como decorrência de forças alheias a este recurso. Além das aplicações em economia, como o próprio nome das rotinas indica, estas funções foram desenvolvidas para estudos de poluição por fontes pontuais e modelagem do comportamento de incêndios em florestas, por exemplo. Considerando os mecanismos atuantes nos processos de erosão hídrica (Wischmeier e Smith, 1978; Bertoni e Lombardi Neto, 1992), pode-se dizer que a distribuição espacial da erosão pode ser considerada uma mistura das análises de fluxo em rede e de espalhamento (Valenzuela, 1991; Eastman, 1995). Fora o comprimento de rampa, os demais fatores de erosão encerram dados cujos atributos podem ser caracterizados localmente, independente da posição geográfica (Valeriano, 1999).

Baseado na semelhança funcional entre o conceito de custo anisotrópico e a distribuição geográfica de comprimento de rampa, este trabalho apresenta a adaptação da análise para o mapeamento digital da variável em microbacias, tratando-se as feições topográficas como elementos do custo. O desenvolvimento metodológico abrange a avaliação das características estatísticas e geoestatísticas do comprimento de rampa e o controle dos processos digitais com medidas cartográficas manuais e dados de campo.

## Material e métodos

A microbacia do córrego São Joaquim estende-se por uma área de 3.142ha no Nordeste do Estado de São Paulo, próximo ao município de Pirassununga (Figura 1). Está inserida na Depressão Periférica, na região denominada por Almeida (1964) de médio Tietê, aproximadamente entre os paralelos 22°00' e 22°05'S e os meridianos 47°20' e 47°35'WGr.

O córrego São Joaquim é afluente do ribeirão Descaroçador, integrando, por meio deste, a microbacia do rio Mogi-Guaçu. As altitudes variam entre 595 m na embocadura do São Joaquim e 822 m nos divisores perto das cabeceiras do afluente norte. O relevo dominante é constituído por sucessivos morros de topo subaplainado, com vertentes côncavas, em geral. Com menor frequência, ocorrem morros de topo arredondado, com vertentes convexas e com comprimento chegando a atingir 1.500 m. A declividade distribui-se predominantemente entre 2% e 20%.

Os dados topográficos utilizados provêm das cartas topográficas (IGC) 1:10.000, com equidistância vertical de 5m, folhas Córrego São Joaquim, SF-23-Y-A-I-2-NE-D; Bairro Barroçã, SF-23-Y-A-II-1-NO-C; e Bairro da Saúde, SF-23-Y-A-II-1-NO-E. Os dados digitalizados com mesa digitalizadora para o desenvolvimento deste trabalho provieram da carta topográfica (IAC) 1:20.000, com equidistância vertical de 10m, Mapa Planialtimétrico da Microbacia do Córrego São Joaquim, compilada das mesmas cartas topográficas 1:10.000 (IGC).

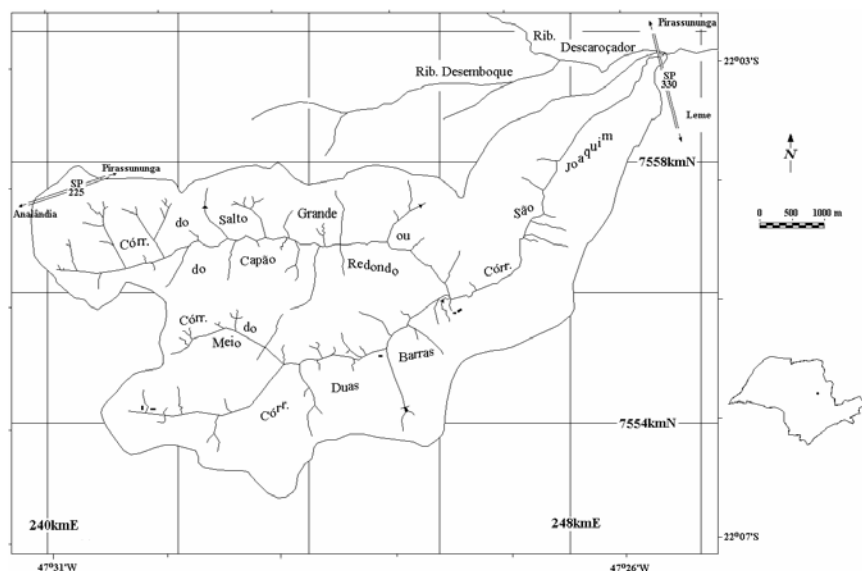
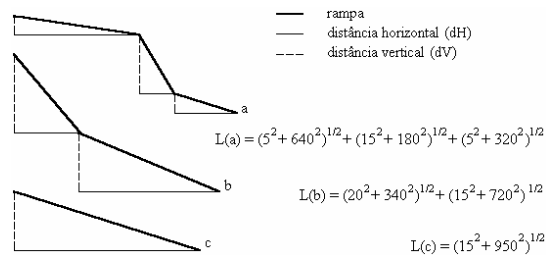


Figura 1. Localização da área de estudo

As medidas cartográficas do comprimento de rampa foram desenvolvidas tendo em vista a padronização das medições e a confiabilidade dos resultados. Uma vez que o comprimento de rampa é medido ao longo da superfície do terreno, a dimensão vertical (dV), ou seja, a diferença de cota entre os pontos, foi medida com as distâncias horizontais (dH) para compor um triângulo retângulo, cuja hipotenusa equivale ao comprimento de rampa. Rampas desuniformes em declividade foram representadas como um encadecamento de até três rampas uniformes (Figura 2).

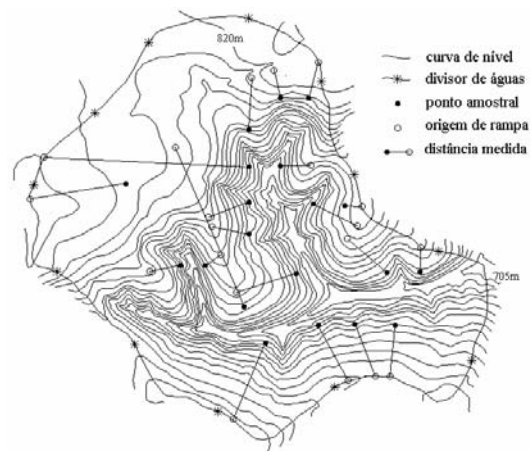


**Figura 2.** Exemplos de perfil de rampa segundo o modelo geométrico

Embora o comprimento de rampa seja concebido como uma medida de distância reta, na natureza observam-se, ocasionalmente, curvas no movimento de enxurradas. Isto está condicionado, entre outros fatores, a características de rugosidade e a detalhes da superfície topográfica do terreno. Portanto, de maneira genérica, fica difícil estabelecer os limites de curvatura e de confluência da movimentação de águas superficiais quando se faz uma análise através da cartografia. A medida das distâncias requer o estabelecimento da posição do traçado e do limite superior da rampa, ambos muito suscetíveis à subjetividade, quando não bem definidos. Para o caso trivial, quando a rampa se dirige diretamente a um pico ou a um divisor de água, não há problemas. Porém, há pontos internos à bacia que dão origem a rampas de orientação diferentes, intersecantes ou radiais, cujos limites superiores não se localizam em divisores de água identificáveis como tal. Na Figura 3 está exemplificada a leitura da distância horizontal de rampa sobre a carta topográfica de 20 casos representativos, com uma metade dos pontos amostrais em cada situação.

Para pontos amostrais em situação não-trivial, deve-se fazer a medição em uma semi-reta transversal à curva de nível a partir do ponto amostrado até que a deflexão destas indiquem mudança na orientação da vertente. Nesse caso, a reta encaminha-se a montante, interceptando as sucessivas isolinhas em ângulo cada vez menor, até

lhes ficar próximo a uma posição paralela, onde deve ser assinalada a origem desta rampa. Ressalta-se que esta posição equiivale à origem da rampa sob o modelo geométrico, servindo unicamente para a medição da distância horizontal. Por este motivo, seu traçado muitas vezes se apresenta diferente dos fluxos de escoamento esperados, com linhas de medição de rampas diferentes cruzando-se eventualmente. Porém, este critério garante que o valor da medida esteja sempre entre a distância simples do ponto até o divisor de águas mais próximo (subestimativa) e a distância curvilínea indicada pelas isolinhas (superestimativa).



**Figura 3.** Obtenção das distâncias horizontais de rampa na carta topográfica em pontos amostrais exemplificados

Os valores de comprimento de rampa foram medidos graficamente no mapa numa grade de 200 m de espaçamento. A resolução de 200 m foi estabelecida para uma amostragem sistemática, inicialmente, porém houve a necessidade de um esquema de amostragem adicional (Figura 4), indicada pela análise geoestatística preliminar dos dados de declividade. A análise cartográfica foi também realizada de maneira seletiva, para pontos escolhidos por apresentarem declividade muito alta. Os três esquemas forneceram um total de 916 amostras.

Os dados de campo, levantados em uma pequena amostragem parcial, foram avaliados de maneira mais expedita. Foram formados os pares com a medição cartográfica (1:10.000) e os resultados de SIG extraídos nos pontos correspondentes e plotados em diagrama de dispersão (campo *vs.* carta e campo *vs.* SIG) como apoio à discussão dos resultados.

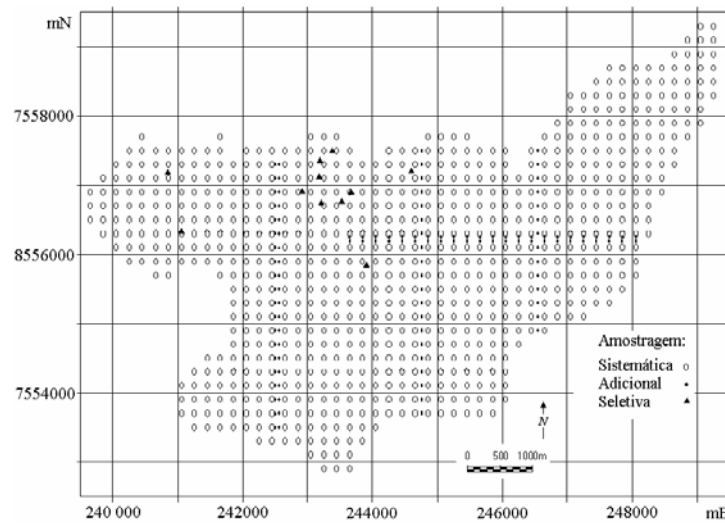


Figura 4. Dados cartográficos para controle com a localização das amostras

Para a determinação do posicionamento dos pontos, foram usados, simultaneamente, recursos variados. Foram confrontados dados (x e y) de GPS, amarrações planimétricas com feições conhecidas e avaliações feitas por toda a equipe de campo, sobre mapas detalhados da superfície sombreada das áreas selecionadas, como no exemplo da Figura 5.

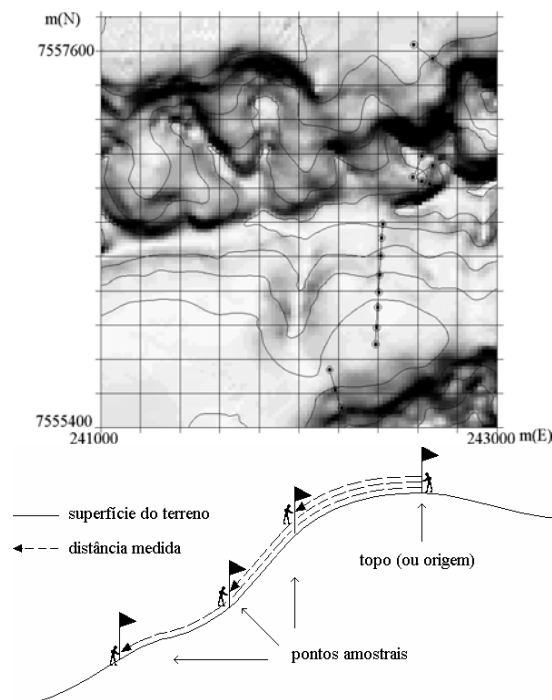
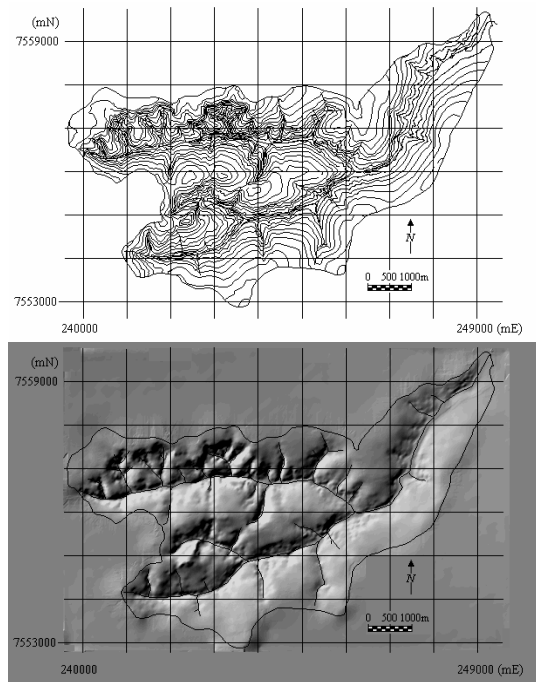


Figura 5. Esquema de localização dos dados de campo sobre a superfície sombreada e levantamento de comprimento de rampa

Baseando-se na morfologia do terreno, a posição presumida de cada ponto observado foi registrada nestes mapas, principalmente nas áreas de relevo íngreme. Os pontos amostrados nas áreas de relevo suave foram localizados por meio de técnicas topográficas, com apoio de feições reconhecíveis e previamente mapeadas. Além do posicionamento das medidas, a definição da orientação da rampa mostrou-se muito difícil nesta condição, devido à dificuldade de percepção da vertente em relevo quase plano, permitindo que se posicionassem pontos medidos em retas com direção ligeiramente defasada da direção do gradiente local, indicado pela carta topográfica. As posições definitivamente atribuídas às medidas foram deduzidas a partir da associação da documentação cartográfica disponível, com posterior aferição com as informações encontradas no cadastro de propriedades rurais. De cada ponto amostrado, as rampas foram delineadas com auxílio de trenas, marcando-se em cada uma um ou mais pontos, além do topo, com estacas para a determinação do posicionamento. A distância até o topo, ou origem da rampa, foi registrada com a trena deitada sobre a superfície do terreno.

As curvas de nível foram digitalizadas conforme o sistema de amostragem objetivo (Gao, 1995) e foram transferidas para uma imagem (grade regular, sistemática) de 10 m de resolução, da qual foram reamostrados 1000 pontos aleatórios para a análise geoestatística com o programa *VarioWin* (Pannatier, 1996). A análise forneceu os parâmetros do modelo de variabilidade, os quais foram necessários para a interpolação feita através de krigagem. Os parâmetros obtidos na análise geoestatística (escala,

alcance, tipo de modelo e efeito pepita) foram aplicados na krigagem visando à obtenção de MDE em grade regular na resolução de 20 m (Figura 6). O arquivo contendo todos os pontos digitalizados (que compõem as curvas de nível) foi exportado para o programa *Surfer* (Golden Software Inc., 1995), onde executou-se a interpolação.



**Figura 6.** Curvas de nível digitalizadas (à esquerda) e o Modelo Digital de Elevação (MDE) formado com a resolução de 20 m (à direita)

O cálculo digital do comprimento de rampa foi baseado na análise de custo anisotrópico, que envolve a aplicação de quatro planos de informação (origem, força, direção e atrito), além da função do atenuamento em relação ao desvio angular da declividade. A análise de custos anisotrópicos foi executada usando-se o programa *Idrisi* (Eastman, 1995), e as imagens de entrada, contendo as feições topográficas de interesse, foram extraídas do MDE através de geoprocessamento. Os cinco elementos da análise, ou seja, direção, forças, origem, atrito e funções angulares de atenuamento, foram substituídos respectivamente pelas feições topográficas orientação (aspecto), declividade, divisores de água, distância unitária e uma função angular selecionada empiricamente. Os dois primeiros elementos são de obtenção simples e facilmente entendidos, mas os demais exigiram desenvolvimentos específicos. A obtenção do PI de origem, ou divisores de água, se baseia na derivação da imagem de altimetria (Valeriano e Moraes, 2001).

A direção foi obtida diretamente do MDE com a função conhecida como aspecto, que atribui a cada pixel valores de ângulo de  $0^\circ$  a  $360^\circ$  de acordo com a orientação local da vertente. Os valores da imagem de forças, requisitados pela análise em escala de 0 a 1, foram obtidos normalizando-se a imagem de declividade pelo seu valor máximo resultante. A distância unitária, ou distância por *pixel*, corresponde à distância do escoamento pela superfície, através de cada célula da imagem. É, portanto, função das dimensões do pixel, direção e declividade da vertente de cada ponto. A imagem de distância unitária foi calculada espacialmente através de sobreposição de imagens e operações escalares, após a aplicação de funções trigonométricas sobre as imagens de direção e declividade.

A função angular é o único elemento escalar da análise de custos anisotrópicos. Os valores da imagem de aspecto expressam a direção de máxima força, que não é, contudo, a única direção de forças positivas. Assim, é necessário descrever o padrão médio de decaimento das forças, desde a direção de aspecto (força máxima) até a direção transversa (força nula), o que é feito pela função angular. Esta descreve o decaimento em função do desvio entre direções de pixels alinhados numa mesma vertente. As funções angulares testadas foram o cosseno elevado à  $1^a$ ,  $2^a$ ,  $10^a$  e à  $100^a$  potência.

O restante do desenvolvimento matemático consistiu num fluxo cíclico de testes e seleção das condições de obtenção destes elementos e de operação da análise, até que não mais houvesse melhorias no desempenho atingido em termos de correlação com os dados de controle. Para cada elemento, diferentes parâmetros e condições foram testadas na aplicação da análise e o conjunto de resultados (após amostragem) foi comparado com os dados de controle por meio de análise de correlação. Os parâmetros foram gradualmente modificados enquanto houve crescimento do coeficiente de correlação, até que este se estabilizasse. Selecionada a melhor condição, esta foi aplicada nos testes sobre o elemento seguinte e assim por diante. Após o sistema ser retro-alimentado *n* vezes no fluxo cíclico, o desempenho se estabilizou indicando as condições e parâmetros ideais para esta aplicação da análise. Os testes apresentados nos resultados correspondem ao último este ciclo de testes, em que se pode observar o efeito das condições de cada elemento sobre a análise, quando operada com os demais elementos nas condições ideais (Figura 7).

Os procedimentos de obtenção dessas imagens incluem algumas opções e operações específicas que podem melhorar a correlação, mas há outras que

devem ser evitadas. O custo calculado foi melhor correlacionado ao comprimento de rampa medido quando a imagem de forças (declividade normalizada) foi suavizada duas vezes. Melhorias no desempenho também ocorreram quando a imagem de direção foi obtida depois de se suavizar o MDE até 6 vezes. Os procedimentos selecionados para tratamento dos dados topográficos foram codificados em um programa de lote (*Idrisi Macro Language*) e aplicados definitivamente no MDE (Figura 8).

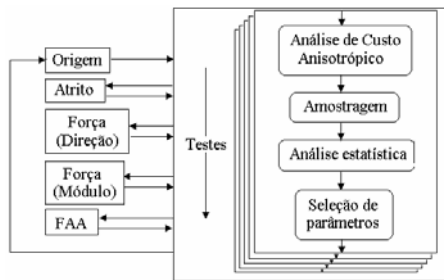


Figura 7. Fluxo do desenvolvimento do cálculo digital do comprimento de rampa através da análise de custo anisotrópico

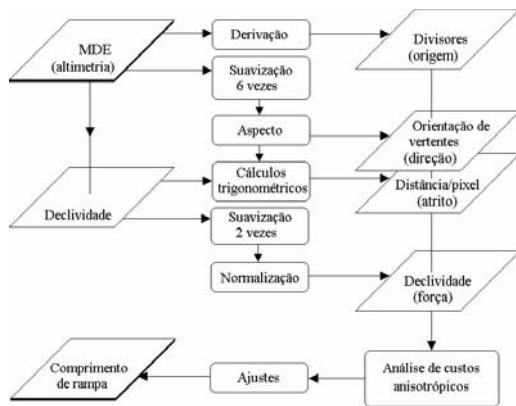


Figura 8. Processamento do MDE para obtenção do comprimento de rampa

Além das análises de correlação (MINITAB Inc., 2000), os resíduos padronizados (Neter e Wassermann, 1974) foram calculados para verificar as condições de maiores desvios da estimativa do comprimento de rampa. O resíduo padronizado de uma estimativa é o desvio normalizado pelo valor observado da variável. Os resíduos padronizados do comprimento de rampa (obtido com os métodos selecionados) foram estruturados em uma imagem para o mapeamento dos erros.

**Resultados e discussão**

Foram levantados detalhes funcionais sobre o levantamento do comprimento de rampa através de

análise cartográfica. Estas informações permitiram que fossem avaliados os efeitos de simplificações necessárias ou convenientes para flexibilidade operacional de métodos de obtenção. Algumas considerações foram julgadas importantes sob este ponto de vista:

- componente vertical das rampas: o peso da componente vertical no cálculo de comprimento de rampa está apresentado nos dados da Figura 9. Considerando a declividade média da microbacia (11%), um intérprete poderia achar conveniente simplificar a medição considerando somente a dimensão horizontal, com um erro médio (de sub-estimativa) de aproximadamente 0,5%. O efeito de escalonamento da rampa é adicionado a este erro, resultando nos pontos fora da curva de erro teórico calculado.
- escalonamento das rampas: o escalonamento, ou segmentação, da leitura dos parâmetros de rampa, foi aplicado em 4,8% dos pontos medidos, de acordo com a necessidade detectada durante a análise cartográfica. Mesmo nestes pontos, o efeito da simplificação para uma única rampa foi reduzir a estimativa em 1,21%, para o caso máximo.

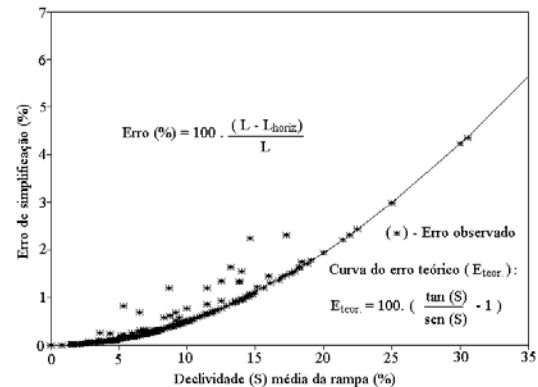


Figura 9. Variação do erro de simplificação da dimensão vertical do comprimento de rampa (L) em função da declividade média da rampa

- a origem de certas rampas se localizou no percurso de outras rampas, bastando haver ângulo reto entre as orientações de vertentes vizinhas. É difícil estabelecer a que ângulo se deve encerrar a acumulação de distâncias, obrigatoriamente inferior a 90°. Com efeito, a definição tradicional de comprimento de rampa, ou seja, a distância de cada ponto até o divisor de água através da vertente, não pode ser aplicada para a maioria dos casos

observados. A inobservância deste detalhe tende a causar superestimativas no levantamento do comprimento de rampa.

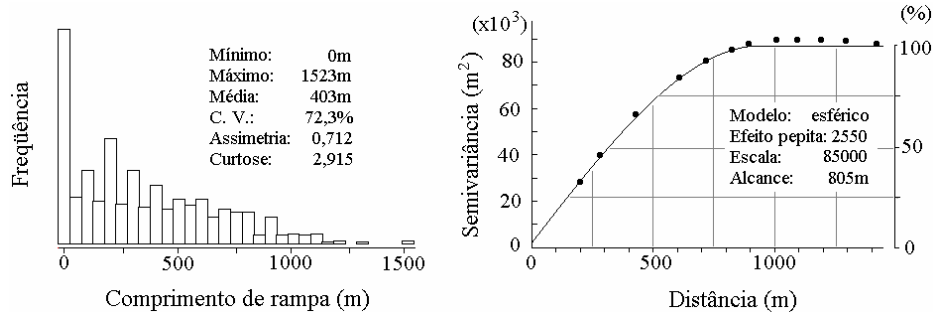
Estes detalhes, bem como os demais fundamentos observados no levantamento do comprimento de rampa por análise cartográfica, apontam para as limitações e a necessidade de estabelecimento de critérios para os métodos manuais. Contudo, permitiram um levantamento padronizado do comprimento de rampa, o que formou um conjunto de dados de controle representativo da microbacia, submetido a avaliações estatísticas e geoestatísticas (Figura 10).

Os altos coeficientes de variação do comprimento de rampa estão ligados à alta assimetria de sua distribuição, deslocada para os baixos valores (Figura 10). Estas distribuições decorrem do fato de a microbacia apresentar, por toda a região perimetral, valores baixos de comprimento de rampa. Como para todo polígono, as faixas perimetrais correspondem a áreas maiores que as áreas internas, este tipo de distribuição pode ser considerado típico para uma microbacia por inteiro. A única possibilidade de descontinuidades no valor de comprimento de rampa ocorre em torno da drenagem, onde se encontram margens opostas (ou rampas) de um mesmo canal. Nestas áreas ocorre o encontro de vertentes independentes, o que permite grandes diferenças de comprimento de rampa em curta distância, sobretudo nos canais de drenagem com seção transversal assimétrica. Com efeito, o semivariograma mostra que a variável distribui-se com continuidade, o que é corroborado pelo conceito de distância/comprimento. O comportamento do semivariograma indica também que medidas de comprimento de rampa espaçadas em 100 m podem ser interpoladas com erro (variância) de estimativa inferior a 25%. Tomando como critério de generalização cartográfica da variável (Robinson *et al.*, 1978), células de 1 mm no cartograma significam que o comprimento de rampa pode ser mapeado com erros esperados inferiores a

25% da variância em escalas de até 1:100.000. Nas escalas de 1:250.000, 1:500.000 e 1:1.000.000, os erros de mapeamento esperados são de aproximadamente 41%, 69% e 100% da variância, respectivamente. Neste último caso, a distância entre células (1.000 m) supera, além do alcance do modelo (100% da variância), o comprimento máximo de grande parte das vertentes.

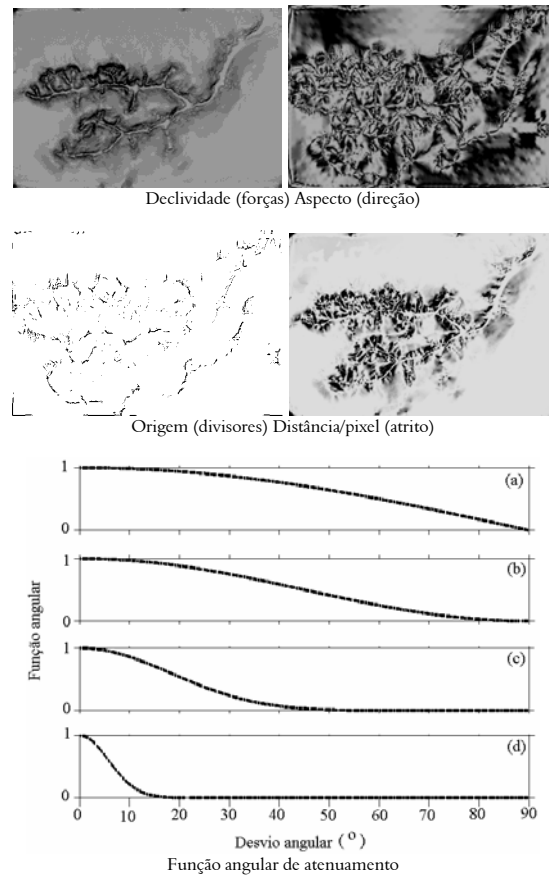
As quatro imagens preparadas para a análise de custos anisotrópicos apresentaram aparência distinta entre si, apesar de descenderem todas do mesmo MDE (Figura 11). A declividade, o aspecto e a distância unitária estão apresentadas com tonalidades claras para valores baixos (branco para zero) e escuros à medida em que se têm valores altos. A aparência metálica da imagem de direção se explica pelo comportamento da reflexão especular, que obedece ao ângulo de exposição das superfícies, comportando-se do mesmo modo que a codificação dos ângulos de direção na paleta usada. A distância unitária combina propriedades das imagens de declividade e direção, uma vez que é calculada através de funções trigonométricas das duas. A imagem de divisores, de acordo com sua natureza lógica (booleana), foi apresentada com uma paleta branca (não, ou 0) e preta (sim, ou 1).

Os melhores resultados foram obtidos com as imagens apresentadas as quais foram selecionadas na seqüência cíclica de testes designada para avaliar cada procedimento em suas variantes, em função da correlação atingida. As funções angulares testadas (Figura 11, à direita, a:  $f=\cos$ ; b:  $f=\cos^2$ ; c:  $f=\cos^{10}$  e d:  $f=\cos^{100}$ ) causaram variadas respostas da análise, modificando fortemente a distribuição espacial do custo resultante. A função  $f=\cos^2$  forneceu os melhores resultados. Houve decréscimo da correlação quando se suavizou a imagem de direção ou quando se modificou a distribuição de forças, através de radiações sucessivas. Para cada opção testada, diferentes equações de ajuste foram obtidas pelas análises de regressão, variando tanto o intercepto como o coeficiente angular.



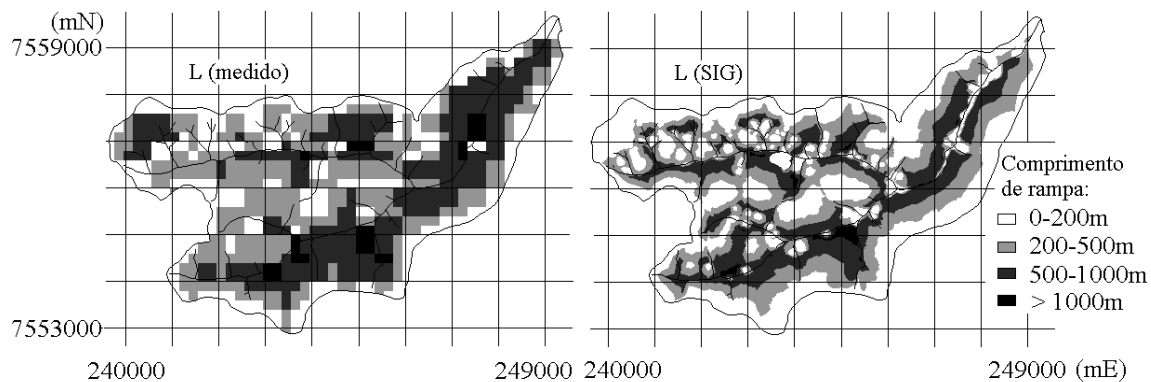
**Figura 10.** Histograma e semivariograma dos dados de comprimento de rampa medido





**Figura 11.** Elementos da análise de custos anisotrópicos: imagens derivadas do MDE (à esquerda) e funções angulares de atenuamento

Com os procedimentos estabelecidos e programados, o SIG estimou o comprimento de rampa com uma correlação de  $r^2=0,642$ . Na Figura 12 se apresentam os mapas de comprimento de rampa das leituras cartográficas e aquele estimado

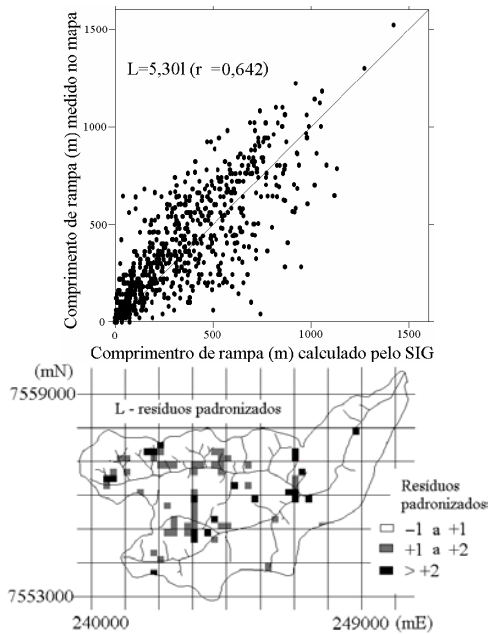


**Figura 12.** Resultados medidos e estimados (SIG) para comprimento de rampa (L)

por SIG. Apesar da visível diferença de distribuição territorial das classes de variação entre os dois mapas, percebe-se que as classes de comprimento de rampa estimado por SIG se sucedem coerentemente ao longo de cada vertente.

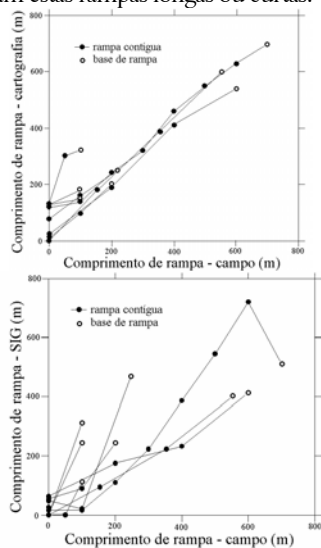
A equação de ajuste simplificado (intercepto=0) nas condições operadas está apresentada no diagrama de dispersão da Figura 13. A distribuição dos resíduos padronizados do comprimento de rampa mostrou que a estimativa desenvolvida determinou a variável com resíduos entre -1 e 1 para quase toda a área. O resíduo da estimativa foi maior do que 2,0 apenas em pontos críticos, tais como divisores de água e canais de drenagem. Os locais de resíduos entre 1 e 2 mostraram a mesma tendência, com poucas exceções. Os erros se concentraram no noroeste da microbacia.

Os conjuntos de resultados da análise de custo anisotrópico mostraram grande variação numérica entre as diferentes condições de operação testadas no desenvolvimento, além de variação de correlação. O coeficiente angular apresentado na equação de ajuste (Figura 13) refere-se à regressão com constante nula, obtida sob a melhor condição de correlação, em que a constante mostrou-se não significativa a  $p>5\%$ . Considerando a possível variação da magnitude de seus resultados, pela sensibilidade do processamento, recomenda-se fazer o ajuste do custo anisotrópico em relação a um conjunto de dados de controle do comprimento de rampa, medido sobre pontos amostrais em transeptos de vertentes representativas da área de interesse. O programa de macro desenvolvido, com os exatos parâmetros e condições de operação da análise de custo anisotrópico selecionados neste trabalho, contém este ajuste.



**Figura 13.** Avaliação dos resultados de SIG para estimativa do comprimento de rampa: diagrama de dispersão e distribuição espacial dos resíduos padronizados

A Figura 14 apresenta a dispersão dos resultados digitais e cartográficos em relação ao levantamento de campo, em que pontos medidos seqüencialmente numa mesma vertente estão conectados por linhas. As estimativas do comprimento de rampa mostraram-se bem ajustadas aos dados de campo, sobretudo o levantamento cartográfico (Figura 14). No caso da estimativa por geoprocessamento, desvios maiores são observados em geral para pontos localizados na base das rampas, sejam estas rampas longas ou curtas.



**Figura 14.** Dispersão dos valores de comprimento de rampa retirados da cartografia e de SIG em relação aos dados de campo

## Conclusão

O comprimento de rampa apresentou continuidade espacial compatível com resolução espacial relativamente baixa, mas deve ser obtido com detalhamento cartográfico suficiente para o reconhecimento das feições topográficas necessárias à sua caracterização.

A medição manual do comprimento de rampa pode ser simplificada, sem grandes prejuízos de precisão, medindo-se somente as distâncias horizontais.

O trabalho de campo mostrou a dificuldade de levantamento direto do comprimento de rampa e, portanto, a conveniência dos levantamentos indiretos. A medição do comprimento de rampa no campo mostrou-se dificultada por algumas peculiaridades: a orientação da rampa, muito clara na cartografia, torna-se de difícil percepção no campo, sobretudo em áreas de pequena declividade; a medição com trena requer a vertente desimpedida; e a posição da origem (topo), geralmente sobre área plana, é suscetível a grandes variações, conforme o julgamento do técnico no campo.

O comprimento de rampa foi convenientemente estimado pela análise de custos anisotrópicos, cujos resultados se mostraram correlatos ao comprimento de rampa, demandando o ajuste da magnitude de seus resultados com dados de controle medidos através de análises de regressão.

O geoprocessamento de MDE foi capaz de gerar as imagens necessárias para a execução de análises de conectividade, cujo desenvolvimento pode favorecer a modelagem do comprimento de rampa e de outros fenômenos associados por meio de funções de SIG.

As vantagens operacionais das técnicas digitais apresentadas permitem o mapeamento do comprimento de rampa em alta resolução, compensando-se parcialmente os erros de precisão numérica da estimativa, com correlação ( $r^2$ ) de 0,642. O comprimento de rampa observado no campo mostrou-se bem estimado através de mapas e, com maior dispersão, por geoprocessamento.

A estimativa do comprimento de rampa por SIG foi afetada pela conformação local do relevo, com melhores estimativas em áreas de terreno suave e erros mais pronunciados e frequentes em torno de vertentes com alta declividade e pequeno comprimento de rampa.

## Agradecimentos

Este trabalho integra o projeto “Padronização de metodologias para tratamento de dados topográficos de microbacias”, financiado pelo CNPq. O autor

agradece a imprescindível participação técnica dos colegas Douglas Pereira de Souza, Gilberto Nóbrega da Luz e Olavo de Freitas Caires, do IAC, durante o levantamento de campo; MINITAB™ é uma marca da Minitab Inc. nos Estados Unidos e em outros países e foi usada neste trabalho com a permissão do fabricante.

### Referências

- ALMEIDA, F. F. M. Fundamentos geológicos do relevo paulista. *Boletim. Instituto Geográfico e Geológico*. São Paulo, n.41, p.167-262, 1964.
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. *Conservação do Solo*. 3. ed. São Paulo: Ícone, 1992.
- CASTRO, A. G.; VALÉRIO FILHO, M. Simulação da expectativa de perdas de solo em microbacia sob diferentes manejos florestais. *Rev. Bras. Cienc. Solo*, Campinas, v.21, n.3, p.419-26, 1997.
- DESMET, P. J. J.; GOVERS, G. A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units. *J. Soil Water Conserv.*, Auvery, v. 51, n. 5, p. 427-433, 1996.
- EASTMAN, J. R. *Idrisi for Windows - User's Guide*. Worcester, MA: Clark University, 1995.
- FERRARI, J. A.; HIRUMA, S. T. Utilização do software Idrisi no mapeamento da suscetibilidade à erosão. In: SIMPÓSIO de USUÁRIOS IDRISI, 1., 1996, Campinas. *Resumos...* Campinas: FEAGRI/UNICAMP, p.67-68, 1996.
- GAO, J. Comparison of sampling schemes in constructing DTMs from topographic maps. *ITC J.*, Wagenigen, 1995-1, p. 18-22, 1995.
- GOLDEN SOFTWARE. *Surfer Version 6.01- Surface Mapping System*. Golden: Golden Software, Inc., 1995.
- KINNEL, P. I. A. Slope length factor for applying the USLE-M to erosion in grid cells. *Soil Tillage Res.*, Amsterdam, v.58, n.1, p.11-17, 2001.
- MINITAB INC. *Meet MINITAB, Release 13 for Windows*. Pennsylvania: State College, 2000.
- MOLNÁR, D. K.; JULIEN, P. Y. Estimation of upland erosion using GIS. *Computers and Geosciences*, Nepean, v.24, n.2, p.183-192, 1998.
- NETER, J.; WASSERMANN, W. *Applied linear statistical models: regression, analysis of variance and experimental designs*. Homewood: Richard. D. Irwin, 1974. 842p.
- PANNATIER, Y. *VarioWin: software for spatial data analysis in 2D*. New York: Springer-Verlag, 1996.
- RANIERI, S. B. L. *et al.* Aplicação de índice comparativo na avaliação do risco de degradação das terras. *Rev. Bras. Cienc. Solo*, Campinas, v. 22, n.4, p.751-60, 1998.
- ROBINSON, A. H. *et al.* Processing and generalizing geographical data. In: ROBINSON, A. H. *et al.* (Ed.). *Elements of Carthography*. New York: John Wiley and Sons, 1978, cap. 6, p. 106-136.
- ROCHA, J. V. *et al.* Metodologia para determinação do fator comprimento de rampa (L) para a equação universal de perdas de solo. In: SIMPÓSIO DE USUÁRIOS IDRISI, 1., 1996, Campinas. *Resumos...* Campinas, 1996, p. 3-6.
- VALENZUELA, C. R. Data analysis and models. In: BELWARD, A. S.; VALENZUELA, C. R. (Ed.). *Remote Sensing and Geographical Information Systems for resource management in developing countries*. Euro Courses: Remote Sensing, vol. 1. Kluwer: Kluwer Academic Publishers, 1991. cap. 18, p. 335-348.
- VALERIANO, M. M. *Estimativa de variáveis topográficas para modelagem da perda de solos por geoprocessamento*. 1999. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 1999.
- VALERIANO, M. M.; MORAES, J. F. L. Extração de rede de drenagem e divisores por processamento digital de dados topográficos. In: X SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, Foz do Iguaçu, PR, 21-26 de abril de 2001. CD-ROM, Arquivo 084.pdf. 8p.
- WISCHMEIER, W. H. , SMITH, D. D. *Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning*. Washington DC.: USDA/ARS, 1978. (Agricultural Handbook n° 537).
- ZACHAR, D. *Soil erosion*. Amsterdam: Elsevier, 1982. 548p (Developments in Soil Science, 10).

Received on March 25, 2002.

Accepted on August 21, 2002.