

(1)

IX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS
RIO DE JANEIRO (4 A 10 NOV 91)

USO DE UM MODELO NUMÉRICO DO TERRENO PARA A OBTENÇÃO DOS
PARAMETROS TOPOGRAFICOS DA EQUAÇÃO UNIVERSAL DE PERDA DE SOLO
MODIFICADA

USE OF A DIGITAL TERRAIN MODEL IN THE OBTENTION OF THE MODIFIED
UNIVERSAL SOIL LOSS EQUATION TOPOGRAPHICAL PARAMETERS

ALFONSO RISSO

Aluno de Mestrado

PIERRE CHEVALLIER

Chargé de Recherche ORSTOM (França), Consultor

Instituto de Pesquisas Hidráulicas
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Caixa Postal 530
90001 - Porto Alegre - RS

RESUMO -- Os Modelos Numéricos de Terreno (MNT) constituem uma nova ferramenta para avaliar os parâmetros descritivos da geomorfologia de uma determinada região. Os autores apresentam neste artigo uma aplicação na área dos recursos hídricos ao cálculo automático dos parâmetros de comprimento de vertente e de declividade que entram na Equação Universal de Perda de Solo Modificada (EUPSM, Williams, 1975). A metodologia proposta é aplicada a bacias hidrográficas da região do Planalto Médio (Rio Grande do Sul), cujas áreas de drenagem estão compreendidas entre 1,5 e 100 km², utilizando um MNT com uma resolução de 100 x 100 m.

ABSTRACT -- Digital Terrain Models are a new tool to evaluate parameters describing the geomorphology of a given region. In this article the authors present an application to the field of water resources for automatic computation of topographic parameters used in the modified universal soil loss equation (MUSLE, Williams, 1975). The method proposed is applied to catchments in the Planalto Médio (Middle Plateau) region of Rio Grande do Sul, Brazil, with drainage areas between 1.5 and 100 km², using a DTM with a 100 x 100 m pixel.

ORSTOM Fonds Documentaire

21 FEV. 1992 N° : 34.992 ex1

Cote : B M P68

INTRODUÇÃO

Os Modelos Numéricos do Terreno (MNT), nome dado normalmente a uma grade digital regular de altitude, vem se mostrando uma ferramenta muito útil dentro da área de recursos hídricos.

Para a obtenção automática de parâmetros topográficos e geomorfológicos referentes aos modelos de produção de escoamento e sedimentos, como por exemplo declividades, comprimentos de vertentes, índices de concavidade, entre outros, assim como a determinação da rede de drenagem e dos divisores de água de bacias hidrográficas, foi implementada uma série de algoritmos que funcionam no ambiente de um Sistema de Informações Geográficas (SIG), utilizando como base de dados um MNT.

Como área teste foi escolhida a bacia hidrográfica do Arroio Taboão, de aproximadamente 100 km² de área. Esta bacia faz parte do sistema de drenagem do rio Potiribu, situado na região fisiográfica do Planalto Médio, no Estado do Rio Grande do Sul. Esta região encontra-se submetida a processos erosivos, devido a forte ação antrópica (principalmente monocultura da soja).

Neste trabalho apresenta-se uma metodologia para estimar automaticamente os parâmetros topográficos L (comprimento de vertente) e S (declividade de vertente) da Equação Universal de Perda de Solo Modificada (EUPSM) (Williams, 1975), de bacias hidrográficas de aproximadamente 2, 20 e 100 km² utilizando-se como base de dados um MNT com resolução de 100 x 100 metros da referida área teste.

MODELAGEM NUMERICA DO TERRENO

Qualquer representação digital da variação contínua do relevo de uma superfície, pode ser chamada de Modelo Numérico do Terreno (MNT). Entre os diversos tipos de representações digitais de superfícies, o mais conhecido é a chamada matriz ou grade regular de altitudes. Este produto pode ser obtido através de medições diretas sobre pares estereoscópicos de fotografias aéreas, feitas em estereo-plotadoras analíticas, ou a partir da interpolação de dados pontuais espaçados regular ou irregularmente.

O tipo de interpolador utilizado para a geração de uma matriz regular de altitudes é o chamado modelo de ajuste local, por ser mais indicado para o estudo de fenômenos com pequeno intervalo de variação e, consequentemente, um número relativamente grande de pontos amostrais.

EQUAÇÃO UNIVERSAL DE PERDA DE SOLO MODIFICADA

A EUPSM (1) é específica para de bacias hidrográficas. Este modelo de produção de sedimentos pode ser expresso assim :

$$A = R \times K \times LS \times C \times P \quad (1)$$

onde A é a perda de solo em unidade de massa por unidade de área e unidade de tempo, R o fator referente a erosividade da chuva ou do escoamento superficial, K o fator de erodibilidade do solo, LS o fator topográfico, C o fator de manejo, e P o fator de práticas conservacionistas.

A classificação de uma bacia hidrográfica quanto ao seu potencial de perda é feita através da estimativa da média de cada um dos fatores acima descritos.

Equação Universal de Perda de Solo (EUPS)

O desenvolvimento da EUPS (Wischmeier e Smith, 1965), foi elaborado sobre parcelas padronizadas de 22,13 metros de comprimento e 9% de declividade. Desta forma se obteve um fator topográfico LS (produto dos fatores L e S) assim definido :

$$LS = (x / 22,13)^M (0,065 + 0,045s + 0,0065s^2) \quad (2)$$

onde x é o comprimento da vertente em metros ; M, um expoente tabelado segundo a declividade num intervalo de 0,2 a 0,5 e s a declividade em porcentagem.

Equação Universal de Perda de Solo Modificada (EUPSM)

Williams e Berndt (1976), descrevem a aplicação da EUPS à bacias hidrográficas. O termo x é a média do caminho percorrido pela água sobre a superfície da bacia. Para determinar x, considerou-se a bacia como sendo retangular com um único canal no centro deste retângulo, na direção longitudinal. A largura da bacia é igual a razão da área do retângulo pelo comprimento do canal. Como o canal está localizado no centro da bacia, a distância percorrida pela água corresponde à metade da largura do retângulo. Desta forma o fator x, para bacia de maior complexidade, foi assim estimado :

$$x = 0,5 DA / LCH \quad (3)$$

onde DA é a área de drenagem da bacia e LCH é o comprimento total dos canais da bacia.

A declividade média, s_i, entre cada curva de nível é calculada a partir de um mapa topográfico pela expressão :

$$s_i = (H (LC_j + LC_{j+1}) / (2 DA_i)) 100\% \quad (4)$$

onde s_i é a declividade média em porcentagem para a área i entre as isolinhas j e j+1 ; H, a diferença de altura entre as isolinhas; e DA_i, a área entre as isolinhas j e j+1.

A declividade média da bacia, s, é calculada pela ponderação do incremento das declividades entre as isolinhas segundo a área entre elas, podendo ser expressa da seguinte forma :

$$s = (\sum_{i=1}^n s_i \cdot DA_i) / DA \quad (5)$$

onde n é o número de áreas entre as isolinhas dentro da bacia.

O fator topográfico (LS) médio da EUPSM da bacia é então estimado pela equação (2), trocando x e s respectivamente pelo resultado das equações (3) e (5).

As principais alterações apresentadas na atual metodologia são as de agilizar o processo de cálculo dos termos pertinentes ao fator topográfico LS e dar uma abordagem mais realísticas em suas estimativas, dentro de um contexto hidrológico.

METODOLOGIA

Sistema computacional

A geração do MNT utilizado como base de dados, foi executada em um micro-computador dentro do ambiente do sistema de informações geográficas SGI (desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE). A obtenção das informações necessárias para a confecção dos mapas de rede de drenagem, das bacias hidrográficas, assim como o cálculo do fator topográfico (LS) da EUPSM a partir de um MNT foram feitos através de um conjunto de programas desenvolvidos especialmente para este trabalho.

Base de dados

Modelo Numérico do Terreno -- A geração da grade regular de altitudes foi feita a partir da interpolação local por método de média móvel (Burrough, 1986), das curvas altimétricas do mapa topográfico da região do Arroio Taboão, na escala 1:50 000. Foi obtida uma matriz de altitudes de 139 linhas por 201 colunas, com uma resolução espacial de 100 x 100 metros.

Mapa da rede de drenagem -- Como já foi visto, a definição de comprimento de vertente médio de uma bacia, corresponde a distância média percorrida pela água sobre a superfície da bacia até a rede de drenagem, desta forma é evidente que para a obtenção automática dos termos constituintes do fator (LS) da EUPSM, se faz necessária a existência de informações referentes a localização da posição dos divisores de águas das bacias e da rede de drenagem para definir o início e o fim respectivamente dos caminhos supostamente percorridos pela água sobre o MNT.

Para isto, foi desenvolvido um programa que segue as diretrizes de um algoritmo apresentado por Mark (1984), simulando o escoamento das águas sobre um MNT. Tal algoritmo assemelha-se com a definição do teorema de Cauchy que estabelece que a menor distância entre qualquer ponto sobre uma superfície curva e um ponto inferior, é a linha de descenso mais íngreme.

O algoritmo proposto por Mark faz a varredura da matriz de altitudes através de uma janela de 3 x 3 células. Para cada célula, a altitude é comparada com a dos seus oito vizinhos mais próximos

dentro da janela de 3 x 3 células. O menor vizinho é marcado e o acúmulo de água (expresso como uma função do número de células atravessadas e a área de cada célula) é assignado sobre a célula. A janela, então é movida para o vizinho menor e o processo é repetido. As linhas de drenagem podem ser codificadas numa escala de níveis de cinza de acordo ao volume de água que passe sobre elas (Burrough, 1986).

Mapeamento das bacias elementares -- Para o mapeamento automático das bacias elementares foram desenvolvidos uma série de programas baseados no algoritmo criado por Mark et al. (1984) para determinação dos divisores de bacias hidrográficas utilizando como base de dado um MNT.

O algoritmo de Mark et al. (1984) estima os divisores de água a partir do cálculo do gradiente local e a orientação de cada célula do MNT. A célula correspondente à saída de cada bacia elementar pode ser determinada manualmente ou calculada iterativamente por critérios da sua ordem da rede de drenagem (Band, 1986), ou como neste trabalho pela imposição de limiares de área. O programa procura por todas as células que estejam a montante da saída da bacia e dentro da mesma, usando uma janela de 3 x 3 células. Partindo da saída da bacia, uma célula é definida como a montante da célula central da janela (figura 1), se a sua orientação for no sentido do centro da janela. A orientação é quantificada usualmente em oito níveis.

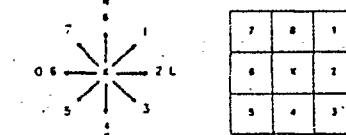


Figura 1 : Classes de orientação para uma célula do MNT.

Cálculo do fator topográfico utilizando um MNT

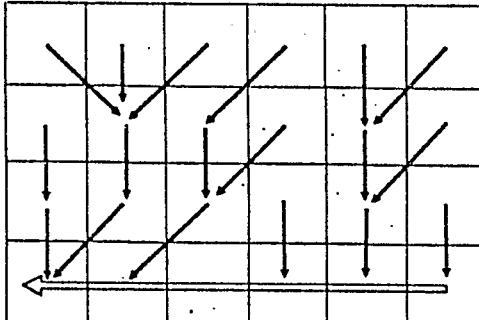
A estimativa da declividade média (s) e do comprimento da vertente (x) médio de uma bacia hidrográfica é calculada a partir da matriz de orientações e de vazões acumuladas (Jenson et al., 1988).

São consideradas como início da vertente todas as células que não tem nenhum vizinho orientado em sua direção, isto é, que possuam vazão acumulada igual a zero, e é considerada rede de drenagem as células que recebam contribuição igual ou maior do que quinze células vizinhas, isto é, uma área de contribuição equivalente a 150 000 m². (este valor foi estimado com base em observações de campo). Pela inversão do algoritmo de Mark et al.

(1984), determinam-se a declividade e o comprimento da vertente seguindo o caminho dado pela orientação de cada célula. Ao chegar a rede de drenagem calcula-se a declividade média da vertente.

Feito isso para todas as vertentes da bacia, então calcula-se as médias das declividades e dos comprimentos de vertentes da bacia (figura 2).

As células superiores correspondem a um divisor de água



As células inferiores correspondem a um eixo de drenagem

Figura 2 : Representação do cálculo do comprimento e da declividade dos vertentes

Considerando-se que uma bacia (B) possua m células que definem os seus divisores de águas, podemos expressar x e s matematicamente da seguinte maneira :

$$x_j = \sum_{k=1}^n D_k \quad (6)$$

onde x_j é o comprimento da vertente j ; D_k , a distância entre as células de maior gradiente de declividade dentro da janela 3×3 na célula k ; n , é o número de células da vertente j . Logo :

$$x_B = \sum_{j=1}^m x_j / m \quad (7)$$

onde x_B é o comprimento de vertente médio da bacia B ; x_j , o comprimento da vertente j ; e m , o número de vertentes da bacia. E :

$$s_k = (H_k - H_k^*) / D_k \quad (8)$$

onde s_k é a declividade na célula; $H_k - H_k^*$ é a diferença de altitude entre as células de maior gradiente de declividade dentro da janela 3×3 na célula k . Então :

$$s_j = \sum_{k=1}^n s_k / n \quad (9)$$

onde s_j é a declividade média da vertente j , e n o número de células desta vertente. Logo

$$s_B = \sum_{j=1}^m s_j / m \quad (10)$$

onde s_B é a declividade média da bacia, s_j declividade média da vertente j e m o número de vertentes.

RESULTADOS

Aplicando-se a metodologia acima citada, sobre o MNT correspondente geograficamente a superfície da bacia do Arroio Taboão, foi possível, determinar os valores de x e s e do fator LS , assim como a área e o perímetro de um conjunto de 26 bacias entre 1 e 2 km^2 , 3 bacias entre 15 e 20 km^2 e uma de aproximadamente 100 km^2 . Esses resultados estão presentes na tabela 1.

Com a finalidade de comparar os resultados com a metodologia tradicional (Williams e Berndt, 1976), também foram calculados os valores x , s e LS de 3 bacias, de 1, 20 e 100 km^2 , presentes na tabela 2.

A figura 3, corresponde às bacias e à rede de drenagem, automaticamente estimadas. Na figura 4, temos uma representação tridimensional do MNT.

A precisão dos valores de x está estritamente ligada a resolução espacial do MNT, no caso $100 \times 100 \text{ m}$. Provavelmente, com uma malha mais fina, se obterá um resultado mais preciso. No entanto, como o MNT deste estudo foi gerado a partir de um mapa na escala de 1:50 000 e com equidistância vertical das curvas de nível de 20 m, é impossível alcançar um resultado melhor.

Quanto a metodologia desenvolvida por Williams e Berndt para o cálculo de x , esta esbarra numa limitação imposta pela precisão referente à escala do mapa topográfica. O problema se resume a que a representação gráfica da rede de drenagem, dependendo da escala, acaba subestimando o comprimento da mesma, o que influí diretamente na obtenção do fator LS , considerando que este não depende da escala, como se pode verificar nas tabelas 1 e 2.

Se pode notar a grande homogeneidade dos valores obtidos pela metodologia desenvolvida neste trabalho. Ela destaca uma malha geomorfológica também bastante homogênea e representativa da região fisiográfica do Planalto Médio.

Bacia Hidrográfica do Arroio Taboão.

nome	área km ²	perímetro km	x m	s %	LS
B 1	1,99	6,90	260	6,6	2,2
B 2	1,45	4,98	250	7,6	2,7
B 3	1,09	4,28	250	7,9	2,8
B 4	1,77	5,60	270	6,3	2,1
B 5	1,29	5,86	270	6,1	2,0
B 6	1,20	4,44	240	7,9	2,8
B 7	1,97	6,14	250	8,7	3,2
B 8	1,93	6,35	270	7,0	2,9
B 9	1,95	6,20	280	7,1	2,6
B 10	1,00	5,44	260	8,7	3,2
B 11	1,39	5,77	250	7,4	2,6
B 12 (Donato)	1,38	4,75	230	7,4	2,5
B 13	2,00	5,95	290	6,8	2,4
B 14	1,37	5,24	280	5,2	1,7
B 15	1,62	5,90	250	8,3	3,0
B 16	1,04	4,30	260	5,5	1,7
B 17	2,00	5,70	240	6,6	2,1
B 18	1,01	4,40	270	6,9	2,4
B 19	1,40	5,82	240	6,5	2,0
B 20	2,00	6,22	290	6,0	2,1
B 21	2,00	6,10	290	5,0	1,6
B 22	1,95	6,35	280	6,3	2,2
B 23	1,65	5,92	300	5,6	1,9
B 24	1,59	5,70	260	6,8	2,3
B 25	2,00	8,06	290	5,0	1,7
B 26	1,94	6,27	290	5,9	2,0
Rincão	20,0	21,6	280	6,4	2,2
Turcato	19,3	20,3	260	6,9	2,3
Mambuca	18,7	21,4	280	6,0	2,0
Taboão	105	55,8	270	6,6	2,3

Tabela 1 : Resultados obtidos automaticamente a partir do MNT

nome	área km ²	perímetro km	x m	s %	LS
B 12 (Donato)	1,29	4,72	140	5,5	1,3
Turcato	19,4	19,8	280	5,5	1,8
Taboão	105	53,3	320	5,2	1,8

Tabela 2 : Resultados obtidos manualmente a partir do método de Williams e Berndt

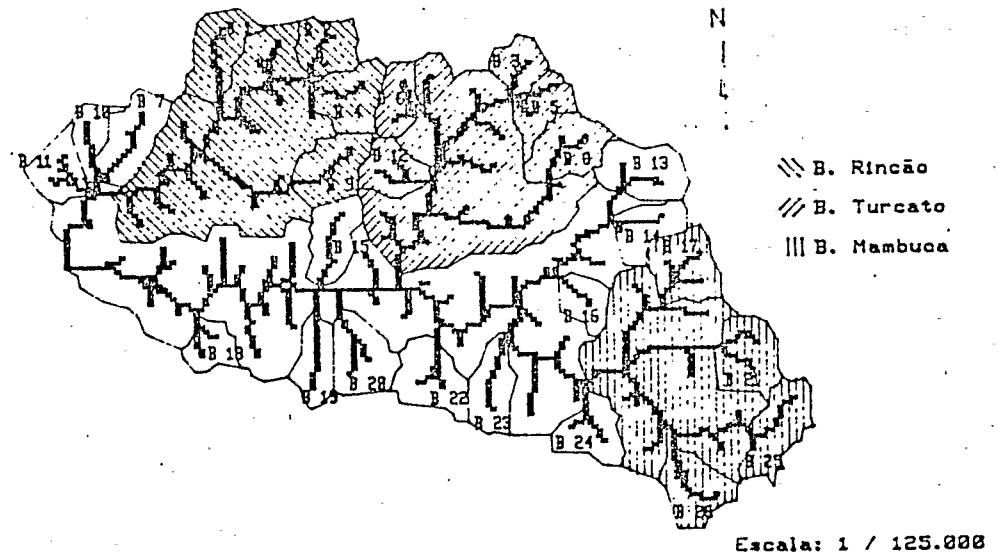


Figura 3 : Determinação automática das bacias e da rede de drenagem

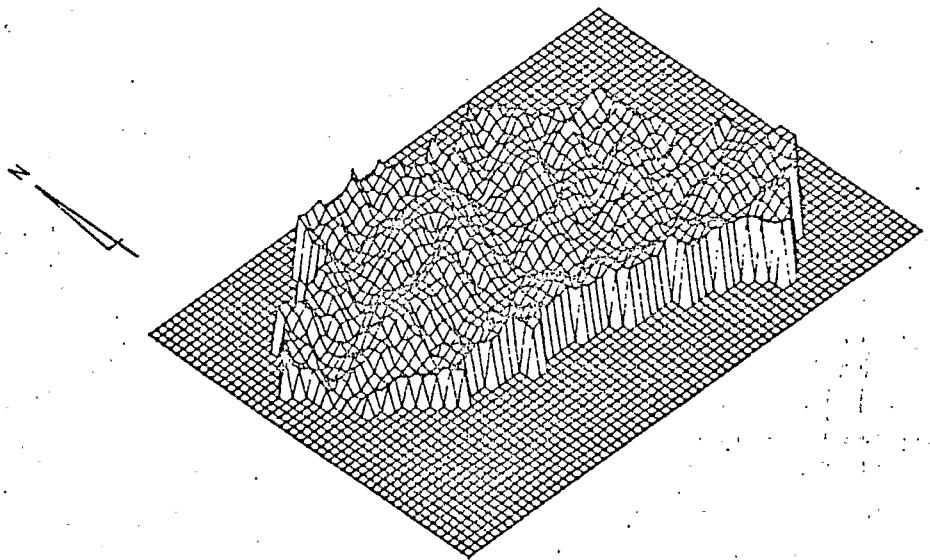


Figura 4 : Representação tridimensional do MNT da bacia do Arroio Taboão

CONCLUSÃO

A metodologia desenvolvida, usando modelagem numérica do terreno para estimar o fator LS, mostrou-se bastante eficaz e realística, já que é muito mais rápida, e simula o comportamento do escoamento da água, quanto a topografia, sobre a superfície da bacia.

Os algoritmos explicados também podem ser usados para outros estudos relacionados ao escoamento superficial como estimativas de vazões de bacias, cálculo de tempo de concentração e, através do cruzamento com outros fatores (cobertura do solo, tipo de solo, etc), uso de modelos mais complexos (Quinn et al., 1991).

REFERENCIAS

BAND, L.E., (1986), Topographic partition of watershed with digital elevation model. Water Resources Research, vol.22, nº1, p.15-24.

BURROUGH, P.A., (1986), Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment. Oxford, Clarendon Press.

JENSON S. e DOMINGUE, J.O., (1988), Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol.54, nº11, p.1593-1600.

MARK, D.M., (1984), Automated detection of drainage networks a from digital elevations models. Cartographica nº21, p.168-178.

MARK, D.M., DOZIER, J. e FREW, J., (1984), Automated basin delineation from digital elevation model data. Geoprocessing nº2, p.299-311.

QUINN, P., BEVEN, K., CHEVALLIER, P. e PLANCHON, O., (1991), The hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using digital terrain models. Hydrological Process, vol.5, p.59-79.

WILLIAMS, J.R. e BERNDT, H.D., (1976), Sediment yield prediction based on watershed hydrology. Transactions of the ASAE, p.1100-1104.

WILLIAMS, J.R., (1975), Sediment routing for agricultural watersheds. Water Resources Bulletin, vol.11 nº5, p.965-974.

WISCHMEIER, W.H. e SMITH D.D., (1965), Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservatio planning. Purdue, United States Departament of Agriculture.