

Estimativa do Coeficiente de Difusão do Relevo a Partir da Curvatura das Encostas: Uma Discussão Metodológica¹

Carla Bilheiro Santi² & Nelson Ferreira Fernandes³

UFRJ - Universidade Federal do Rio de Janeiro
Departamento de Geografia - Laboratório de Pedologia
21941.590 - Rio de Janeiro RJ
carla@solos.geo.ufrj.br. & nelson@solos.geo.ufrj.br.

¹ Pesquisa Financiada pelo CNPq e pela FUJB/UFRJ

² Bolsista de Iniciação Científica -CNPq

³ Professor Ajunto

Abstract: Convex hilltops are typical features of many landscapes around the world. Their origin has been attributed to the work of diffusive processes like creep, rainsplash and biogenic activity. Mathematical models show, however, that the hillslope curvature also depends on the baselevel conditions, associated with the incision rate at the base of the profile. This work discusses how to estimate the diffusion coefficient of hillslopes, a basic parameter of mathematical models, based on the curvature of hillslope profiles. The results suggest that the method can be applied to a wide range of geomorphological situations and can be used to test theoretical hypothesis, like the idea of dynamic equilibrium.

Keywords: Convex Hillslopes, Diffusive Processes, Mathematical Modelling

Introdução

Encostas com topos convexos bem arredondados são feições comuns em muitas regiões do mundo e, em especial, no domínio de "Mar de Morros" do Sudeste brasileiro. A origem destas formas, no entanto, ainda é motivo de grande discussão na literatura geomorfológica.

No final do século passado e início deste, Davis (1892) e Gilbert (1909) já tratavam desta questão de forma bem clara, associando estas formas a processos geomorfológicos específicos ligados, em geral, ao transporte pôr rastejo. Atualmente, esta visão de causa e efeito entre o tipo de processo e a forma resultante ainda possui firmes raízes na literatura geomorfológica. Por exemplo, tem-se que a origem desses topos convexos está associada à atuação de processos de transporte tais como rastejo (creep), salpico (rainsplash) e atividade biogênica (Carson & Kirkby, 1972; Summerfield, 1991; Selby, 1993).

No entanto, como descrito por Fernandes (1995), uma grande variedade de modelos matemáticos têm mostrado que a curvatura dos perfis de encostas depende não apenas do tipo de processo de transporte mas também da taxa de incisão atuante na base da encosta (Armstrong, 1980 e 1987; Ahnert, 1987 e 1988). Estes modelos dão suporte, também, a idéia de equilíbrio dinâmico proposta por Hack (1975) ao mostrarem que perfis de encosta em equilíbrio são

desenvolvidos em relevos evoluindo por longos períodos de tempo sob um mesmo tipo de processo e sob a mesma taxa de incisão.

Modelos matemáticos tem se mostrado uma importante ferramenta nos estudos geomorfológicos e, em especial, naqueles voltados à caracterização da evolução do relevo ao longo do tempo geológico (Fernandes, 1996).

Sabe-se, no entanto, que esses modelos só se tornam efetivos se os parâmetros por eles utilizados forem "confiáveis", ou seja, se refletirem as características básicas dos processos os quais descrevem. Dessa forma torna-se fundamental que os valores utilizados nos parâmetros destes modelos sejam obtidos a partir de dados de levantamentos de campo e/ou experimentos de laboratório.

Este trabalho visa discutir os problemas metodológicos associados à determinação de um dos parâmetros mais importantes dentro dos modelos de evolução de encostas, o coeficiente de difusão (degradação) do relevo, a partir da curvatura de perfis de encostas no campo. A estimativa deste parâmetro através de experimentos de campo não representa uma tarefa fácil de ser alcançada. Isto deve-se ao fato de que este parâmetro, como veremos a seguir, representa a resultante de vários processos de transporte, os quais atuam de forma combinada. Dessa maneira, métodos que representam uma alternativa aos experimentos de campo devem ser desenvolvidos.

Teoria

Para fins de modelagem matemática, a evolução das encostas pode ser vista como sendo controlada pela competição entre os processos de transporte advectivos (movimento de sedimentos devido ao fluxo da água), predominantes nos canais e processos de transporte difusivos (movimento de sedimentos devido ao gradiente de superfície), predominantes nas encostas (veja essa revisão em Fernandes, 1995).

O arcabouço matemático da teoria de evolução de encostas por processos difusivos foi inicialmente apresentado por Culling (1960). Quando aplicada a perfis de encostas evoluindo sob condições limitadas pelo transporte essa teoria assume que o transporte de massa se dá na forma da Equação 1, mostrando que o fluxo de sedimentos (q_s), em unidades de $[M/LT]$, é diretamente proporcional ao gradiente da encosta,

$$q_s = D \left(- \frac{\partial z}{\partial x} \right) \quad (1)$$

onde z é a elevação, x é a distância em relação ao divisor e D é uma constante de proporcionalidade. Equações de transporte semelhantes à descrita acima têm sido usadas para descrever uma série de processos superficiais, dentre eles o rastejo, salpico e atividade biogênica (Fernandes, 1995). No entanto, poucas são as evidências de campo que atestam um transporte sob a forma da Equação 1. Combinando-se a equação 1 com a Equação de Continuidade (Equação 2):

$$\frac{-\partial z}{\partial t} = \frac{\partial q_s}{\partial x} \quad (2)$$

temos que

$$-\frac{\partial z}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(- \frac{\partial z}{\partial x} \right) \quad (3)$$

Assumindo-se que D é constante ao longo da encosta obtêm-se uma equação na forma da Equação de Difusão (Unidimensional) para materiais homogêneos:

$$\frac{\partial z}{\partial t} = D \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} \quad (4)$$

onde D , na realidade é um coeficiente de difusão (desgaste) do relevo. A Equação 4 demonstra que para perfis evoluindo por processos difusivos, a variação da elevação com o tempo é proporcional a curvatura da encosta.

Na condição de equilíbrio (forma independente do tempo), a variação da elevação com o tempo ($\partial z / \partial t$) é constante ao longo da encosta e pode ser assumida como sendo aproximadamente igual a taxa de rebaixamento do relevo, ou a taxa de dissecação na base da encosta (B_d). Substituindo B_d na Equação de Difusão, tem-se:

$$B_d = D \left(\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} \right) \quad (5), \text{ ou seja}$$

$$\frac{B_d}{D} = \left(\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} \right) = \text{curvatura do perfil.} \quad (6)$$

Integrando-se a Equação 6 com relação a x , temos:

$$\int \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} dx = \int \frac{B_d}{D} dx \quad (7)$$

$$\frac{\partial z}{\partial x} = \frac{B_d}{D} x + c_1 \quad (8)$$

ou seja, uma relação linear entre o gradiente da encosta e a distância do divisor. No caso dos topos convexos, onde os divisores são planos e horizontais ($c_1 = 0$), o coeficiente angular da reta (B_d / D) equívale à curvatura da encosta desenvolvida na condição de equilíbrio. Pode-se, portanto, conforme mencionado por vários autores (Dietrich et. alii., 1987; Fernandes, 1995), em regiões onde a taxa de dissecação do relevo é conhecida, utilizar a Equação 8 para se estimar o coeficiente de difusão do relevo.

Área de Estudo

Os levantamentos topográficos iniciais, associados a este trabalho, foram realizados em diversas encostas na região de Magé (RJ), localizadas bem ao fundo da Baía de Guanabara.

Em termos morfológicos, esta região caracteriza-se por um compartimento topográfico rebaixado constituído, basicamente, por pequenas colinas com topos convexos bem arredondados. Estas colinas, desenvolvidas sobre embasamento cristalino granítico alterado, possuem desnivelamentos de altitude entre 20 e 80 metros.

Metodologia

Para a realização deste trabalho foram selecionadas várias colinas, com topos arredondados, situadas dentro de um raio de cerca de 500 metros. Em cada colina, foram realizados levantamentos topográficos, com uso do teodolito, de modo a permitir a obtenção de perfis de encostas detalhados, em diversas direções, das colinas estudadas. Optou-se aqui pela utilização do teodolito devido à necessidade de que a curvatura da encosta fosse descrita de forma bem detalhada, com pontos obtidos a cada um metro ou dois de distância.

Após a obtenção dos perfis topográficos foi também caracterizada a variação espacial da declividade, ou seja, a curvatura da encosta, plotada em gráficos de declividade vs. distância.

Paralelamente, está sendo feito um levantamento bibliográfico com o intuito de se estimar

os índices de dissecação do relevo, já que através desse dado é mais fácil se obter o coeficiente de difusão. A relação entre a taxa de dissecação na base da encosta ϵ e o coeficiente de difusão do relevo (B_d / D), para cada perfil de encosta é obtida a partir da Equação 8, descrita na teoria.

Embora sejam discutidos os resultados relativos à região de Magé, novos levantamentos estão sendo realizados em outros locais, com características geomorfológicas, geológicas e pedológicas bem distintas, visando caracterizar o papel desses fatores no condicionamento da magnitude do coeficiente de difusão.

Resultados e Discussão

A Figura 1 mostra, em detalhe, os resultados obtidos em dois perfis topográficos em colinas diferentes.

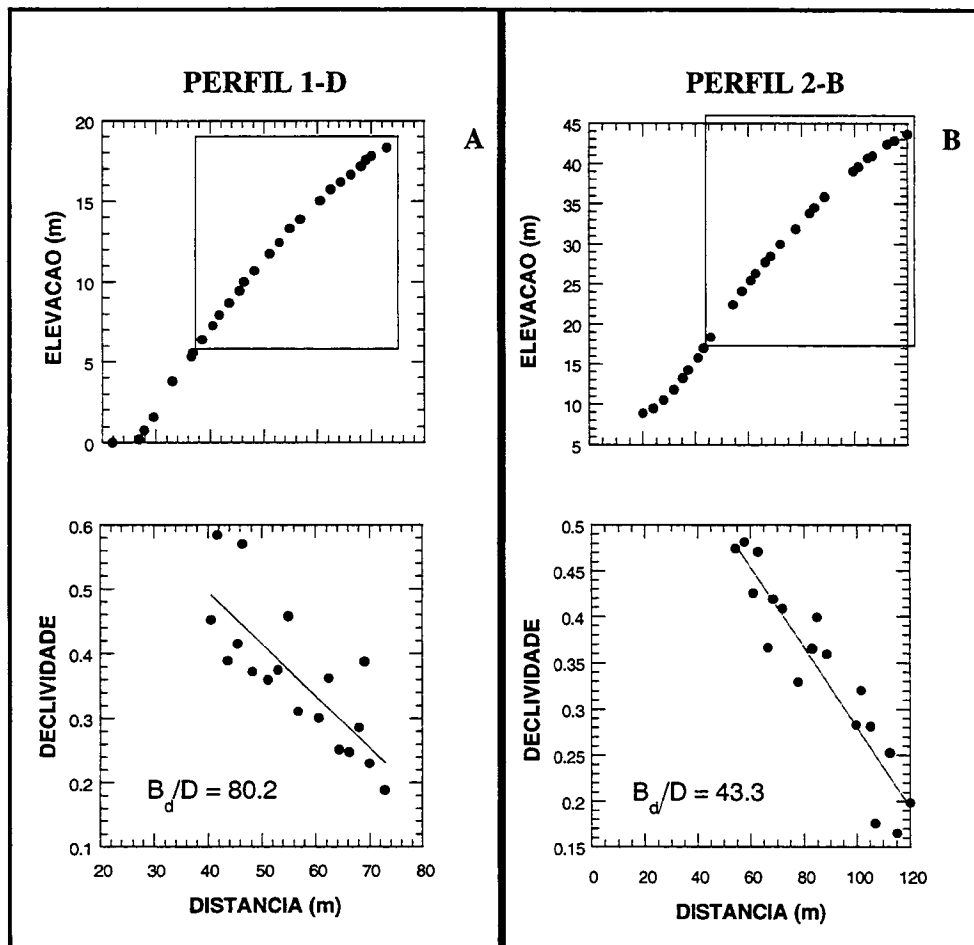


Figura 1 - Método de campo para estimar o D a partir da convexidade do perfil. Os gráficos A e B apresentam, no topo, o levantamento topográfico do perfil, e na base, a variação da

declividade com a distância, somente para área selecionada por um quadrado no gráfico de elevação. A relação B_d / D está em unidades de ($\times 10^{-4} m^{-1}$).

Nesta figura estão representados, no topo, a variação da elevação com a distância e, na base, a variação da declividade com a distância. Como a metodologia aqui empregada refere-se apenas à parte convexa das encostas, a análise da variação declividade com distância foi realizada apenas para a porção convexa da encosta, englobada por um retângulo no gráfico da elevação (topo).

A partir dos resultados mostrados no gráfico da declividade pela distância tornam-se possível estimar,

com base na Equação 8, a magnitude da relação B_d / D de cada perfil de encosta. Como já destacado, cada relação representada pelo coeficiente angular da reta, caracteriza a curvatura do perfil quando este se encontra próximo à condição de equilíbrio dinâmico. Nos dois perfis apresentados na Figura 1, os valores encontrados para esta relação foram de $80.2 \times 10^{-4} m^{-1}$ (Figura 1A) e de $43.3 \times 10^{-4} m^{-1}$ (Figura 1B).

A tabela I sumarizada os resultados obtidos em oito perfis levantados na região de Magé.

Tabela I- Resultados do levantamento topográfico dos perfis de encosta realizados.

PERFIS TOPOGRÁFICOS	CURVATURA DA ENCOSTA $\frac{B_d}{D} (\times 10^{-4} m^{-1})$	EQUAÇÃO DE AJUSTE
Morro 1 - Perfil A	59.9	$y = 0.88023 - 0.0059971x$ R= 0.73731
Morro 1 - Perfil B	40.4	$y = 0.59768 - 0.0040408x$ R= 0.92084
Morro 1 - Perfil C	50.3	$y = 0.70958 - 0.0050369x$ R= 0.46168
Morro 1 - Perfil D	80.2	$y = 0.81594 - 0.0080244x$ R= 0.78842
Morro 2 - Perfil A	48.5	$y = 1.077 - 0.0048513x$ R= 0.72914
Morro 2 - Perfil B	43.3	$y = 0.71333 - 0.0043308x$ R= 0.93097
Morro 3 - Perfil A	32.3	$y = 0.63121 - 0.0032316x$ R= 0.82266
Morro 3 - Perfil B	33.3	$y = 0.65202 - 0.0033345x$ R= 0.7533

Pode-se observar que a relação B_d / D encontrada nesses perfis variou de $32.3 \times 10^{-4} m^{-1}$ a $80.2 \times 10^{-4} m^{-1}$, resultando em uma variação máxima de cerca de 2,5 vezes. É evidente que o coeficiente de difusão dessas encostas só poderá ser estimado quando o valor da taxa de rebaixamento do relevo (B_d) for conhecida. No entanto, algumas inferências podem ser feitas com base nos resultados apresentados na Tabela I. Por exemplo, com base na revisão da literatura apresentada por Fernandes (1994), estima-se que essa taxa B_d pode variar, ao longo das diversas condições geológicas e geomorfológicas existentes, com uma razão de até 1000 vezes. Como os perfis levantados situam-se bem próximos, dentro de um raio de 500 m, pode-se afirmar que a taxa de incisão desses perfis deva ser a mesma, ou muito semelhante. A razão (B_d / D) obtida mostrou-se

muito homogênea nos perfis estudados estima-se aqui que o coeficiente de difusão seja também muito semelhante para todas os perfis estudados, dentro da faixa de variação mostrada pelos dados da Tabela I.

Conclusão

Os resultados apresentados e discutidos possuem, ainda, um caráter inicial. A metodologia aqui apresentada está sendo aplicada a outras regiões no sentido de que possa ser estimada a variação da relação B_d / D entre diversa áreas, com diferentes características geológicas e geomorfológicas.

No entanto, a pouca variação nos valores obtidos, principalmente no que se refere à relação B_d / D , parece mostrar que a metodologia empregada possui

um grande potencial de uso nos estudos voltados, por exemplo, para o diagnóstico da condição de equilíbrio dinâmico.

Claramente, o avanço nessa área do conhecimento está diretamente dependente de disponibilidade de melhores estimativas das taxas de rebaixamento do relevo a diferentes ambientes.

Referências Bibliográficas

AHNERT, F. Approaches to dynamic equilibrium in theoretical simulations of slope development. *Earth Surf. Proc. Landf.*, 12, 1987. p. 3-15.

AHNERT, F. Modelling Landform Change. In M. G. Anderson (Ed.), *Modelling Geomorphological Systems*, John Wiley, New York, 1988. p. 375-400.

ARMSTRONG, A. C. Simulated Slope Development Sequences in a Three-Dimensional Context. *Earth Surf. Proc.* 5, 1980. p. 265-270.

ARMSTRONG, A. C. Slopes, Boundary Conditions, and the Development of Convexo-Concave Forms - Some Numerical Experiments. *Earth Surf. Proc. Landf.*, 12, 1987. p. 17-30.

CARSON, M. A. & KIRKBY, M. J. Hillslope Form and Process. *Cambridge University Press*, 1972.

CULLING, W. E. H. Analytical Theory of Erosion. *J. Geol.*, 71, 1960. p. 336-334.

DAVIS, W. M., The Convex Profile of Badland Divides. *Science*, 20, 1892. p. 245.

DIETRICH, W. E.; RENEAU, S. L. and WILSON, C. J. Overview: "Zero-Order Basins" and Problems of

Os resultados obtidos, embora parciais, não permitem refutar a idéia de que essas colinas com topos convexos da região de Magé representem formas em equilíbrio dinâmico.

Drainage Density, Sediment Transport and Hillslope Morphology. *IAHS Publ.*, 165, 1987. p. 27-37.

FERNANDES, N. F. Hillslope Evolution by Diffusive Processes: the Problem of Equilibrium and the Effects of Climatic and Tectonic Changes. *Ph. D. Thesis, University of California*, Berkeley, 1994. 145p.

FERNANDES, N. F. Modelagem Matemática da Evolução das Encostas por Processos Difusivos. *VI Simp. de Geografia Física Aplicada, Anais, 1*, 1995. p. 535-543.

FERNANDES, N. F. Modelagem Matemática em Geomorfologia: Potencialidades e Limitações. *Anais do I Simpósio Brasileiro de Geomorfologia*, Uberlândia. 1996

GILBERT, G. K. The Convexity of Hilltops. *J. Geol.*, XVII(4), 1909. p. 344-350.

HACK, J. T. Dynamic Equilibrium and Landscape Evolution. In W. N. Melhorn and R. C. Flemal (Eds.), *Theories of Landform Development. State University of New York*, New York, 1975. p. 87-102.

SELBY, M. J. Hillslope Materials & Processes, *Oxford University Press*, New York, 2nd ed. 1993.

SUMMERFIELD, M. A. *Global Geomorphology: An Introduction to the Study of Landforms*. Longman, 1991.