



XVIII
SBGFA

SIMPÓSIO BRASILEIRO DE
GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA

GEOGRAFIA FÍSICA E AS MUDANÇAS GLOBAIS

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ • FORTALEZA - CE • 11 A 15 DE JUNHO DE 2019

MODELOS DE SIMULAÇÃO DA EVOLUÇÃO DO RELEVO: PASSADO, PRESENTE E FUTURO

Nelson Ferreira Fernandes

Departamento de Geografia/IGEO, UFRJ, nelsonff@acd.ufrj.

Eixo: Geotecnologias e modelagem aplicada aos estudos ambientais

Resumo

Nas últimas décadas, os modelos matemáticos de simulação da evolução do relevo (LEMs – *Landscape Evolution Models*) se consolidaram como uma das mais importantes ferramentas de análise geomorfológica. Inicialmente, estes modelos foram utilizados para simular a evolução de perfis de encostas sob a atuação de um único processo superficial. Posteriormente, tais simulações passaram a ser feitas em 3D, incorporaram a atuação conjunta de vários processos assim com atividades tectônicas. Embora a utilização desses modelos venha crescendo rapidamente na pesquisa geomorfológica internacional, raros são os casos de sua aplicação pela comunidade brasileira. O presente trabalho tem como objetivo apresentar uma revisão das bases conceituais desses modelos discutindo suas estruturas, equações de transporte, formas de implementação e principais aplicações. A difusão desses conceitos torna-se etapa fundamental para a ampliação da utilização desses modelos de simulação da evolução do relevo no Brasil.

Palavras chave: modelagem de sistemas ambientais; modelos de simulação; equilíbrio; transiência; processos geomorfológicos

1. Introdução

Os chamados LEMs (*Landscape Evolution Models*), ou modelos de simulação da evolução do relevo em tempos longos, representam importante ferramenta de análise na geomorfologia. Esses modelos matemáticos surgiram na década de 60 do século passado simulando, ainda que forma bem grosseira, a evolução de perfis de encostas submetidos a um processo geomorfológicos predominante



XVIII
SBGFA

SIMPÓSIO BRASILEIRO DE
GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA

GEOGRAFIA FÍSICA E AS MUDANÇAS GLOBAIS

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ • FORTALEZA - CE • 11 A 15 DE JUNHO DE 2019

(Culling, 1960). Posteriormente, os LEMs passaram a simular a evolução de perfis sob vários processos (Armstrong, 1980) e a estimar o tempo de relaxação do relevo de modo a testar hipóteses teóricas como, por exemplo, a ideia do equilíbrio dinâmico (Fernandes e Dietrich, 1997). Mais recentemente, especialmente ao longo das duas últimas décadas, esses modelos tornaram-se bem mais complexos, sendo capazes de simular a evolução do relevo em 3D através da combinação de vários processos geomorfológicos e tectônicos (Tucker et al., 2001).

Nos dias atuais, existem algumas dezenas de LEMs em uso pela comunidade geomorfológica internacional envolvendo diferentes processos geomorfológicos, diferentes processos tectônicos, diferentes escalas espaciais, diferentes escalas temporais, assim como diferentes formas de implementação. Esses modelos têm sido aplicados, por exemplo, na simulação do recuo de escarpas de montanhas (Gilchrist et al., 1994), na evolução de redes de drenagem (Tucker e Slingerland, 1994) (Willgoose et al., 1991), na previsão da espessura dos solos (Dietrich et al., 1993), na datação morfológica de terraços e escarpas de falhas (Nash, 1980), entre muitas outras questões. No entanto, a utilização desses LEMs no Brasil ainda é pouco significativa (Moreira et al., 2012). Dessa forma, o objetivo desse trabalho é fazer uma rápida revisão da base teórica desses modelos, discutindo sua evolução, formas de implementação, equações de transporte dos processos simulados, assim como apresentar exemplos de aplicações potenciais. Espera-se que este tipo de revisão contribua para uma maior difusão da utilização desses modelos pela comunidade geomorfológica brasileira.

2. Histórico Evolutivo

Os primeiros modelos matemáticos simulavam, ainda de forma bem simplificada, a simulação da evolução de perfis de encostas em uma dimensão (Culling, 1965). Naquele momento, a simulação matemática do fluxo de material (solo e rocha) nas encostas era baseada em analogias com equações de fluxo de calor e de difusão química. Posteriormente, os modelos passaram incorporar mais de um processo geomorfológico e condições de contorno (Armstrong, 1987), ocorrendo mais tarde a incorporação de processos tectônicos (Koons, 1989). Um marco nessa evolução foi a realização em 1992 pela AGU (*American Geophysical Union*) da conferência *Tectonics and Topography*, cujos trabalhos foram reunidos em um volume especial da JGR em 1994. Esses trabalhos mostravam uma nova geração de LEMs em 3D, combinando vários processos superficiais e tectônicos (Howard, 1994).



XVIII
SBGFA

SIMPÓSIO BRASILEIRO DE
GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA

GEOGRAFIA FÍSICA E AS MUDANÇAS GLOBAIS

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ • FORTALEZA - CE • 11 A 15 DE JUNHO DE 2019

Atualmente, os LEMs possuem grande poder computacional permitindo a simulação de grandes regiões ao longo de dezenas de milhões de anos. Da mesma forma, importantes avanços ocorreram na obtenção das equações de transporte dos vários processos superficiais envolvidos, tais como: rastejo, escoamento superficial, intemperismo, movimentos de massa, incisão fluvial, soerguimento (Dietrich *et al.*, 2003). Grandes avanços ocorreram também na disponibilidade de modelos digitais do terreno e na obtenção das condições de contorno envolvidas, tais como: taxas de soerguimento (via termocronologia), taxas de intemperismo e de incisão fluvial (via isótopos cosmogênicos), entre outros. Várias revisões podem ser encontradas na literatura sobre as bases teóricas envolvidas e sobre os principais LEMs hoje disponíveis (Codilean *et al.*, 2006).

3. Equações de Transporte e a Implementação dos LEMs

Para que ocorra uma efetiva difusão na utilização dos LEMs no Brasil torna-se necessária a compreensão, por parte dos usuários, de como esses modelos realizam as simulações envolvidas. De um modo geral, esses modelos englobam diferentes equações de transporte que simulam as taxas e os caminhos percorridos pelos materiais presentes (solo e rocha). A evolução da paisagem geomorfológica se dá pela combinação de processos superficiais e tectônicos, ao longo do tempo geológico (Dietrich *et al.*, 2003).

Um ponto comum a todos esses modelos é a incorporação da clássica equação de continuidade, baseada no princípio da conservação de massa, definindo que a variação no armazenamento de uma certa variável (por ex., espessura do solo) será igual à diferença entre os somatórios de entradas e saídas. Ou seja, de um modo bem simples, o material removido por erosão de uma célula no grid, dentro de um certo intervalo de tempo, estará representado como agradação na célula localizada a jusante. Em termos matemáticos, podemos dizer que a variação da elevação de um certo local na paisagem reflete as diferenças entre as taxas de soerguimento e de erosão.

Evidentemente, a combinação da equação de continuidade com as diversas equações de transporte (para cada processo simulado) gera um complexo sistema de equações diferenciais parciais, cuja solução é obtida por métodos numéricos e produz como resultado a variação da elevação com o tempo. Evidentemente, a combinação da equação de continuidade com as diversas equações de transporte (para cada processo simulado) gera um complexo sistema de equações diferenciais parciais, cuja



XVIII
SBGFA

SIMPÓSIO BRASILEIRO DE
GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA

GEOGRAFIA FÍSICA E AS MUDANÇAS GLOBAIS

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ • FORTALEZA - CE • 11 A 15 DE JUNHO DE 2019

solução é obtida por métodos numéricos e produz como resultado a variação da elevação com o tempo para cada célula dentro do grid simulado. Nesses modelos, diversos cenários em termos de condições iniciais (topografia inicial) e de condições de contorno (taxas de soerguimento, de incisão fluvial, etc.) podem ser utilizados nas simulações.

4. Considerações Finais

Os chamados LEMs (*Landscape Evolution Models*) tornaram-se, ao longo das últimas décadas, importante ferramenta em estudos voltados para a análise da evolução do relevo ao longo do tempo geológico. Uma rápida revisão do tema na literatura geomorfológica internacional atesta a existência de mais de uma dezena de modelos (por ex. GOLEM, SIBERIA, CAESAR, CHILD, ZSCAPE, SOILSCAPE, CASCADE). Embora muitos se interessem pela utilização desses modelos em seus estudos, minha experiência no tema ao longo dos últimos 25 anos, tanto em termos de ensino quanto de pesquisa, sugere que muitos esbarram na falta de conhecimento sobre a base conceitual de modelagem (Fernandes, 2016) ou sobre técnicas quantitativas (cálculo e programação). Acredito que tais fatores têm contribuído decisivamente para a pouca utilização desses modelos nas pesquisas geomorfológicas desenvolvidas no Brasil. Portanto, torna-se urgente a incorporação, tanto na graduação quanto na pós-graduação, de disciplinas voltadas para a discussão das bases teóricas da modelagem de sistemas ambientais, assim como para o tratamento quantitativo dos dados envolvidos. Se nada for feito, estaremos aprofundando o distanciamento hoje existente entre as pesquisas internacionais e brasileiras, no que tange a modelagem de sistemas ambientais.

5. Referências Bibliográficas

ARMSTRONG, A. C. Simulated slope development sequences in a three-dimensional context. *Earth Surf. Proc.*, v. 5, p. 265-270, 1980.

_____. Slopes, boundary conditions, and the development of convex-concave forms : some numerical experiments. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 12, p. 17-30, 1987.

CODILEAN, A. T.; BISHOP, P.; HOEY, T. B. Surface process models and the links between tectonics and topography. *Progress in Physical Geography*, v. 30, n. 3, p. 307-333, 2006.

CULLING, W. E. H. Analytical theory of erosion. *J. Geol.*, v. 68, p. 336-344, 1960.



XVIII
SBGFA

SIMPÓSIO BRASILEIRO DE
GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA

GEOGRAFIA FÍSICA E AS MUDANÇAS GLOBAIS

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ • FORTALEZA - CE • 11 A 15 DE JUNHO DE 2019

_____. Theory of erosion on soil-covered slopes. *J. Geol.*, v. 73, p. 230-254, 1965.

DIETRICH, W. E. et al. Geomorphic transport laws for predicting landscape form and dynamics. In: WILCOCK PETER, R. e IVERSON RICHARD, M. (Ed.). *Prediction in Geomorphology*.: American Geophysical Union. Washington, DC, United States. 2003., 2003. p.103-132.

DIETRICH, W. E. et al. Analysis of Erosion Thresholds, Channel Networks, and Landscape Morphology using a Digital terrain Model. *The Journal of Geology*, v. 101, n. 2, p. 259-278, 1993.

FERNANDES, N. F. Modelagem em Geografia Física: Teoria, Potencialidades e Desafios. *Espaco Aberto*, v. 6, n. 1, p. 209-247, 2016.

FERNANDES, N. F.; DIETRICH, W. E. Hillslope evolution by diffusive processes: the time scale for equilibrium adjustments. *Water Resources Research*, v. 33, n. 6, p. 1307-1318, 1997.

GILCHRIST, A. R.; KOOI, H.; BEAUMONT, C. Post-Gondwana Geomorphic Evolution of Southwestern Africa: Implications for the Controls on Landscape Development from Observations and Numerical Experiments. *Journal of Geophysical Research*, v. 99, n. B6, p. 12211-12228, 1994.

HOWARD, A. D. A detachment-limited model of drainage basin evolution. *Water Resource Research*, v. 30, n. 7, p. 2261-2285, 1994.

KOONS, P. O. The topographic evolution of collisional mountain belts: a numerical look at the Southern Alps, New Zealand. *Am. J. Sci.*, v. 289, p. 1041-1069, 1989.

MOREIRA, I. C.; MELLO, C. L.; FERNANDES, N. F. Aplicação de Modelo Matemático de Evolução do Relevo na Simulação do Recuo da Escarpa de Porção da Serra da Mantiqueira, Resende/Itatiaia (RJ). *Anais do 9º SINAGEO - Simpósio Nacional de Geomorfologia*, 2012, Rio de Janeiro, RJ. p.1-5.

NASH, D. Morphologic dating of degraded normal fault scarps. *J. Geol.*, v. 88, p. 353-360, 1980.

TUCKER, G. E. et al. The Channel-Hillslope Integrated Landscape Development (CHILD) Model. In: HARMON, R. S. e DOE III, W. W. (Ed.). *Landscape Erosion and Evolution Modeling*: Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2001. p.349-388.

TUCKER, G. E.; SLINGERLAND, R. L. Erosional dynamics, flexural isostasy, and long-lived escarpments: A numerical modeling study. *J. Geophys. Res.*, v. 99, n. B6, p. 12229-12243, 1994.

WILLGOOSE, G.; BRAS, R. L.; RODRIGUEZ-ITURBE, I. Results from a new model of river basin evolution. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 16, p. 237-254, 1991.