



Alonso Joaquin Juvinao Carbono

**Simulação Computacional para a Evolução do Relevo de
Bacias Hidrográficas**

Tese de Doutorado

Tese apresentada como requisito parcial para
obtenção do título de Doutor pelo Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio.

Orientadores: Luiz Fernando Martha
Co-orientador: Alexandre Lopes

Rio de Janeiro
Setembro de 2010



Alonso Joaquin Juvinao Carbono

**Simulação Computacional para a Evolução do Relevo de
Bacias Hidrográficas**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Luiz Fernando Campos Ramos Martha
Orientador
Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

Dr. Alexandre Antonio de Oliveira Lopes
Co-Orientador
CENPES/PETROBRAS

Prof^a. Deane de Mesquita Roehl
Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

Prof. Eurípedes do Amaral Vargas Júnior
Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

Prof. Luiz Eloy Vaz
Universidade Federal Fluminense

Dr^a. Stefane Rodrigues Xavier Lopes
CENPES/Petrobras

Prof. José Eugenio Leal
Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 24 de setembro de 2010

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Alonso Joaquin Juvinao Carbono

Engenheiro Civil, Mestrado em Estruturas pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Doutorado em Estruturas pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

Ficha Catalográfica

Juvinao Carbono, Alonso Joaquin

Simulação computacional para a evolução do relevo de bacias hidrográficas / Alonso Joaquin Juvinao Carbono ; orientadores: Luiz Fernando Martha, Alexandre Lopes. – 2010.

131 f. : il. (color.) ; 30 cm

Tese (doutorado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2010.

Inclui bibliografia

1. Engenharia civil – Teses. 2. Geomorfologia. 2. Modelagem geológica. 3. Evolução do relevo. 4. Erosão. 5. Sedimentação. 6. Processos fluviais. 7. Computação gráfica. I. Martha, Luiz Fernando. II. Lopes, Alexandre. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. IV. Título.

CDD: 624

À minha Família

Agradecimentos

A Deus.

À PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

Ao meu professor e orientador, Luiz Fernando Martha, pelo apoio e pela confiança depositada para a realização deste trabalho.

Ao meu Co-orientador, Alexandre Lopes, pela ajuda e cooperação.

À Rita, secretária da Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Civil, pela ajuda e colaboração.

Aos meus amigos e colegas de trabalho, Fábio, Rafael, Antônio, Pedro, Chico, Jaiminho, Ricardo, João, pela força e pela constante troca de idéias;

Aos meus amigos e familiares, Celma, Junior, Vitor, Wainlhy, Sean, Fredy, Carla, que de uma forma ou de outra me estimularam ou me ajudaram.

Resumo

Carbono, Alonso Joaquin J.; Martha, Luiz Fernando C. R. **Simulação Computacional para a Evolução do Relevo de Bacias Hidrográficas.** Rio de Janeiro, 2010. 131p. Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A superfície da terra é formada por processos geológicos que geram as rochas, assim como por processos naturais de degradação e de erosão. A erosão destrói as estruturas que compõem o solo e seu transporte é feito pela ação da água da chuva, do vento, da gravidade e até do gelo. A origem e evolução das bacias sedimentares, dentre outros fenômenos, é estudada pela geologia sedimentar, a qual trata do estudo dos processos físicos, químicos e biológicos atuantes na superfície da terra desde o seu início até os dias atuais. Na atualidade, o uso de modelos que permitem analisar processos de escoamento superficial, desprendimento de partículas e de transporte e deposição de sedimentos em bacias hidrográficas é cada vez mais frequente. O uso e análise desses modelos demonstra que, para escalas relativamente pequenas e áreas não muito extensas, o rebaixamento do perfil dos rios está diretamente ligado aos processos de deformação tectônica. Por outro lado, modelos de previsão de evolução do relevo associados com intemperismo, erosão e deposição de sedimentos, considerando escalas espaciais do tipo regional ou continental e escalas de tempo relativamente grandes ($>10^5$ anos) devem ser desenvolvidos acoplando tanto efeitos tectônicos como morfológicos. Neste trabalho é apresentado um modelo computacional que permite analisar a evolução na mudança do relevo de bacias hidrográficas, em pequena e grande escala, assim como estimar a produção de sedimento resultante do processo erosivo. O algoritmo de análise é escrito na linguagem de programação C++ e considera a simulação de diferentes cenários, que incluem deformação tectônica, processos de encosta (difusão e movimentos de massa) e processos de incisão fluvial, dando-se particular atenção à formação e evolução da rede fluvial de drenagem. Para a análise de resultados, o programa oferece a visualização 3D de diferentes superfícies: distribuição dos sedimentos, evolução da rede fluvial, mudanças topográficas do relevo, etc.

Palavras-chave

Geomorfologia; Modelagem Geológica; Evolução do Relevo; Erosão; Sedimentação; Processos Fluviais; Computação Gráfica.

Abstract

Carbono, Alonso Joaquin J.; Martha, Luiz Fernando C. R. **Computer Simulation of Landscape Evolution of Drainage Basins**. Rio de Janeiro, 2010. 131p. DSc. Thesis - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The surface of the earth is formed by geological processes that originate the rocks, as well as for natural processes of degradation and erosion. The erosion destroys the soil structures and the transport of sediments is made by the action of the rain water, wind, gravity and, in some cases, ice. The origin and evolution of sedimentary basins, amongst other phenomena, are studied by the sedimentary geology, which deals with the analysis of physical, chemical and biological processes that act directly on earth surface since its origin until the current days. Nowadays, the use of runoff - erosion models that analyze processes such as detachment of particles and transport and deposition of sediment in drainage basins is every time more frequent. The use of these models demonstrates that, for relatively small scales and not very extensive areas, relief changes are directly related to tectonic processes. On the other hand, landscape evolution models and associated weathering, erosion and deposition with parameterization for regional or continental spatial scales and large time scales ($>10^5$ years), must be developed to adequately couple tectonics and geomorphology. Is presented in this work a computational model to analyze the landscape evolution in hydrographic basins, considering small and large scales, as well as evaluate the production of sediment resultant of the erosive process. The algorithm is written in the programming language C++ and considers the simulation of different scenes, that include tectonics, hillslope processes (diffusion and landslides) and bedrock incision, giving particular attention to the channel network evolution. For the analysis process the program offers the visualization of different 3D surfaces: sediment distribution, drainage network, topographical relieves etc.

Keywords

Geomorphology; Numeric Simulation; Landscape Evolution; Erosion; Sedimentation; Fluvial Processes.

Sumário

1	Introdução	14
1.1.	Objetivos	18
1.2.	Organização do Trabalho	19
2	Revisão Bibliográfica	21
2.1.	Terminologia	21
2.2.	Processos Erosão-Transporte-Sedimentação	23
2.2.1.	A bacia hidrográfica	24
2.2.2.	Processos fluviais	29
2.3.	Modelagem conceitual da evolução da paisagem	31
2.4.	Processos tectônicos	35
2.4.1.	Teoria de tectônica de placas	35
2.4.2.	Deformação crustal	39
2.5.	Modelagem dos processos fluviais	41
2.5.1.	Modelagem da rede de drenagem	55
2.6.	Movimentos de massa em encostas	57
2.6.1.	Classificação dos movimentos de massa	57
2.6.2.	Modelagem numérica	60
2.7.	Aporte de sedimentos no STENO	63
3	Modelo Computacional	66
3.1.	Modelagem da superfície do relevo	66
3.2.	Modelagem da rede fluvial	72
3.3.	Modelagem do transporte fluvial e do processo erosivo - deposicional	80
3.4.	Processos tectônicos	92
3.5.	Movimentos de massa	97
3.5.1.	Solução das equações	98
3.6.	Resumo do algoritmo	98
4	Estudo de Casos e Validação do Modelo	101
4.1.	Modelagem da rede fluvial	101
4.2.	Incisão fluvial	103

4.3. Erosão por difusão	106
4.4. Aporte de sedimentos	108
4.5. Evolução do recuo de uma borda de falha	113
4.6. Deslizamentos	117
4.6.1. Rompimento de uma represa	117
4.6.2. Deslizamentos com base inclinada	122
5 Conclusões	125
6 Referências Bibliográficas	127

Lista de figuras

Figura 1 – Interação dos processos de erosão-transporte-sedimentação e tectônica [6].	16
Figura 2 – Bacia hidrográfica com sua rede de canais.	26
Figura 3 – Classificação da ordem de canais de uma bacia – método de Strahler	28
Figura 4 – Idades do relevo de acordo com o modelo de Davis, (Porcher [18]).	33
Figura 5 – Evolução conceitual do relevo segundo Davis [19].	33
Figura 6 – Tectônica de placas. Limites divergentes, convergentes e transformantes [22].	35
Figura 7 – Tipos básicos de limites de placas.	37
Figura 8 – Convergência oceano-oceano.	38
Figura 9 – Dobra em rocha com diferentes camadas litológicas na região perto de <i>Saint-Godard-de-Lejeune</i> , no Canadá, [24].	40
Figura 10 – Representação do modelo e topografia de drenagem (<i>Steepest-descent</i>).	55
Figura 11 – a) Máxima inclinação, b) Bifurcação (Clevis et al [28]).	56
Figura 12 - Classificação de movimentos de massa em encostas.	59
Figura 13 – Sistema de coordenadas de referência para o sistema de equações do trabalho de Mangeney-Castelnau <i>et al</i> [35].	62
Figura 14 – Aporte de sedimentos no STENO [36].	64
Figura 15 – <i>Grid</i> composto por uma matriz de células representando a superfície do relevo.	67
Figura 16 – região no sudeste brasileiro a) <i>google maps</i> ; b) <i>global mapper</i> ..	68
Figura 17 – Comparação da superfície paleobatimétrica e do relevo em 3D.	69
Figura 18 – Região dos Andes bolivianos. a) <i>google maps</i> ; b) <i>global mapper</i> .	69
Figura 19 – Andes Bolivianos – esquerda, <i>global mapper</i> , direita, modelo desenvolvido.	70
Figura 20 – Mapa da Precordillera Mendoza – relevo e rios da região [33].	70

Figura 21 – Precordillera Mendoza. a) Foto <i>google maps</i> ; b) <i>global mapper</i> .	71
Figura 22 – Precordillera Mendoza. Esq. <i>global mapper</i> ; dir. modelo desenvolvido.	71
Figura 23 – Cálculo da direção do fluxo. Aplicação do modelo <i>steepest descent</i> .	72
Figura 24 – Tratamento de depressões no <i>grid</i> .	73
Figura 25 – Criação de uma única linha de erosão.	75
Figura 26 – Criação de três linhas de erosão.	75
Figura 27 – Célula fazendo parte de varias linhas de erosão.	76
Figura 28 – Criação das linhas de erosão.	76
Figura 29 – Ordenação das linhas de erosão. a) Linhas antes da ordenação; b) Linhas após a ordenação.	77
Figura 30 – Atualização da ordem de linhas de erosão. a) linhas antes da ordenação; b) linhas depois da ordenação; c) linhas depois da atualização.	78
Figura 31 – Modelagem da rede fluvial da região estudada no exemplo 1 da seção 3.1. a) e b) mostram a rede em 2D e 3D, respectivamente.	79
Figura 32 – Modelagem da rede fluvial da Precordillera Mendoza. a) Rede de rios existente; b) Rede de rios obtida com o modelo desenvolvido.	80
Figura 33 – a) <i>Grid</i> com células de 20x20 km mostrando uma linha de erosão. b) perfil inicial do canal cortado pela linha de erosão.	87
Figura 34 – Seleção de um bloco para posterior aplicação de uma taxa de soerguimento.	93
Figura 35 – Soerguimento e deslocamento simultâneo de dois blocos selecionados.	94
Figura 36 – Blocos vizinhos divididos por limite de falha transformante.	96
Figura 37 – Fluxograma do algoritmo.	100
Figura 38 – Foto aérea da bacia Fischenbach, nos Alpes Suíços. a) localização, tomada da referência [25], b) foto de satélite <i>google maps</i> .	102
Figura 39 – Modelagem da bacia Fischenbach – Exemplo 4.1.	102
Figura 40 – Configuração observada e modelada por Schlunegger [25].	103

Figura 41 – Configuração observada e obtida com o modelo desenvolvido.	103
Figura 42 – Configuração inicial do exemplo 4.2.	104
Figura 43 – Configuração final segundo Tucker e Slingerland [26]. 1.6 Ma de erosão contínua (incisão em rocha).	105
Figura 44 – Recuo de borda devido a incisão em rocha para a) 0.5 Ma, b) 1Ma e c)1.6 Ma. Recuo total de 100 km.	106
Figura 45 – Evolução do relevo devido a difusão linear do caso de estudo número 3, segundo Tucker e Slingerland [26].	107
Figura 46 – Recuo de borda do caso No. 3 devido a erosão por difusão linear. Imagem obtida com o modelo proposto.	108
Figura 47 – Configuração inicial do caso 4.4.	109
Figura 48 – Visualização de células submetidas à taxa de soerguimento.	109
Figura 49 – Evolução do relevo ao longo do tempo do caso 4.4.	112
Figura 50 – Localização da bacia de Resende. Tomada da referência [21].	114
Figura 51 – Topografia atual da região estudada no caso 4.5. Bacia de Resende dentro do retângulo vermelho.	114
Figura 52 – Configuração inicial da bacia de Resende.	115
Figura 53 – Evolução do relevo da bacia de Resende.	116
Figura 54 – Configuração final e recuo total do borde de falha da bacia Resende.	117
Figura 55 – Rompimento de represa, h e h_u , $\Delta x = 20$ m.	118
Figura 56 – Rompimento de represa, h e h_u , $\Delta x = 2$ m.	118
Figura 57 – Rompimento de represa, h e h_u , $\Delta x = 20$ m e $\Delta t = 1$ seg.	119
Figura 58 – Rompimento de represa, h e h_u , $\Delta x = 2$ m e $\Delta t = 1$ seg.	119
Figura 59 – Rompimento de represa, lado seco. Comparação Audusse et al [34] e modelo. h e h_u , $\Delta x = 2$ m e $\Delta t = 1$ seg.	120
Figura 60 – Evolução de rompimento de represa, $t = 200$ seg., $\Delta x = 20$ m.	121
Figura 61 – Caso de represa com lado seco. $t = 150$ seg., $\Delta x = 20$ m.	122
Figura 62 – Evolução do deslizamento na bacia Barcelonnette, na França. Tomada de Remaître <i>et al</i> [41].	122
Figura 63 – Fluxo modelado no Matlab.	123
Figura 64 – Resultados do deslizamento da bacia de Barcelonnette. Passos de tempo 12, 24, 48 e 60 segundos.	123

Lista de tabelas

Tabela 1 – Equações da família de modelos <i>stream power</i> [5].	51
Tabela 2 – Características de deslizamentos em encostas	58
Tabela 3 – Classificação de deslizamentos segundo Varnes [32]	60
Tabela 4 – Composição percentual de sedimentos [36].	65
Tabela 5 - Comparação de modelos propostos para simulação de incisão em rocha.	81
Tabela 6 – Descarga volumétrica dos maiores rios do mundo [36].	111
Tabela 7 – Aporte de sedimento por células, caso 4.4.	113
Tabela 8 – Valores de referência para recuo de borda e taxas de erosão. Tomada da referência [21]	116