

Modelagem em Geografia Física: Teoria, Potencialidades e Desafios

Modeling in Physical Geography: Theory, Potentialities and Challenges

Nelson Ferreira Fernandesⁱ
Universidade Federal do Rio de Janeiro
Rio de Janeiro, Brasil

Resumo: A modelagem vem se consolidando como importante ferramenta de análise nos diferentes campos da geografia física. Este artigo busca uma reflexão sobre o uso de modelos na geografia física, discutindo suas bases teóricas, as principais potencialidades de aplicação e os maiores desafios a serem enfrentados. São aqui discutidos modelos voltados para a predição, para a retrodição e para o teste de hipóteses. Ênfase é dada à análise dos modelos matemáticos, sejam eles empíricos, determinísticos ou mesmo estocásticos, discutindo as vantagens e desvantagens do uso de modelos concentrados ou distribuídos, assim como transientes ou de equilíbrio. As diferenças entre as etapas de parametrização, calibração, validação e verificação durante o desenvolvimento de modelos são apresentadas e discutidas. Por último, são apresentados alguns dos principais problemas e desafios associados a um efetivo emprego de modelos na geografia física, com destaque para as relações entre modelagem e metodologia científica, a questão da equifinalidade e a determinação das incertezas envolvidas. A discussão aqui apresentada destaca que modelos com elevado grau de acerto não necessariamente representam “bons modelos” em termos conceituais. Para que a modelagem continue se consolidando como importante ferramenta de análise nos diversos campos da geografia física, torna-se fundamental que os usuários se dediquem à compreensão tanto do funcionamento do sistema a ser modelado quanto do modelo em si utilizado, seja em termos de sua estrutura interna ou das hipóteses ali envolvidas. Caso contrário, o usuário se tornará apenas um “piloto de *software*”, perdendo a oportunidade de transformar os bonitos mapas gerados em efetivas ferramentas de análise científica.

Palavras-chave: modelagem, predição, validação, deslizamento, erosão dos solos, cenários futuros, simulação, equilíbrio dinâmico, relaxação, sensibilidade

Abstract: Modeling must be considered as an important analytical tool inside the different areas of physical geography. This paper discusses the general usage of models in physical geography, focusing on their theoretical basis, potential applications and major

ⁱ Prof. Titular do Departamento de Geografia; Coordenador do LAMPEGE – Laboratório de Modelagem Pedogeomorfológica. nelsonff@acd.ufrj.br.

future challenges. Models applied to studies concentrated on prediction, retrodiction and hypothesis testing are presented. Here, main emphasis is on mathematical models, including those based on empirical, deterministic and stochastic relationships, discussing the potentialities and limitations of concentrated and distributed models, as well as those associated with transient and steady-state models. In parallel, the differences related to the steps of parameterization, calibration, validation and verification during the modeling processes are presented. At the end, the main problems and challenges required to achieve an effective usage of the modeling tools in physical geography are discussed, especially those focusing on the relationships between modeling and scientific methodology, the question of equifinality and the determination of the associated uncertainties. In fact, the review presented here shows that models with high prediction success may not necessarily represent “good models” in theoretical aspects. In order to continue its consolidation as an important analytical tool inside the different physical geography fields, model users need to focus on achieve a better understanding both on the mechanisms controlling the system to be modelled and the model itself, in terms of its internal structure and the associated hypotheses. Otherwise, the model user will be only a “software pilot”, wasting the opportunity of turning the beautiful resulting maps in effective tools of scientific analyses.

Keywords: modeling, prediction, validation, landslide, soil erosion, future scenarios, simulation, dynamic equilibrium, relaxation, sensibility

Introdução

Ao longo das últimas décadas, a modelagem se consolidou como importante ferramenta de análise da pesquisa em geografia física. É evidente o grande número de artigos publicados nas revistas especializadas que utilizam modelos, em especial os matemáticos, na simulação e análise de processos atuantes e formas resultantes. Além das publicações em revistas científicas, diversos livros recentes focam na divulgação das aplicações e nos diversos procedimentos associados a modelagem de diferentes sistemas ambientais (por ex., Woldenberg, 1985; Harte, 1988; Huggett, 1993; Wilcock e Iverson, 2003; Inkpen, 2005; Smith e Smith, 2007; Pelletier, 2008; Ford, 2010; Brunet, 2011; Wainwright e Mulligan, 2013).

Paralelamente, nas últimas décadas diversos textos têm buscado uma discussão mais crítica sobre a ferramenta modelagem (por ex., Haines-Young e Petch, 1986; Bauer *et al.*, 1999; Wolman, 2004; Inkpen, 2005; Blue e Brierley, 2016). Portanto, vale aqui uma reflexão sobre como a ferramenta modelagem vem sendo utilizada na geografia física, discutindo suas bases teóricas, principais potencialidades de aplicação e suas limitações. Este artigo representa uma atualização da análise feita nessa linha a vinte anos atrás que teve foco mais específico na geomorfologia (Fernandes, 1996).

Modelos em Geografia Física

Embora, como já atestado por Minshull (1975), a proposição de modelos conceituais qualitativos seja antiga e associada à própria origem da geografia física, como por exem-

plo a ideia dos ciclos de erosão (Davis, 1899), no final do século XX e início do XXI novas ferramentas, tanto de cunho teórico quanto computacional, tornaram-se disponíveis. Tais modelos numéricos permitem a simulação da evolução do relevo de grandes áreas durante tempos longos (por ex., Ahnert, 1988; Gilchrist, 1995; Codilean *et al.*, 2006; Tucker e Hancock, 2010; Van Der Beek, 2013), passando por estágios que podem ser aproximados aos originalmente propostos como de juventude, maturidade e senilidade do relevo.

Embora as décadas de 1950 e 1960 possam ser caracterizadas como o período inicial de grande difusão do uso de modelos quantitativos em geografia física (por ex., Strahler, 1950a; b; 1952a; Leopold, 1953; Leopold e Maddock, 1953; Strahler, 1954; Chorley, 1957; Leopold e Wolman, 1957; Chorley, 1964), dentro da chamada revolução quantitativa (Burton, 1972), sua origem remonta aos trabalhos de Horton publicados nas duas décadas anteriores (Horton, 1932; 1933; 1945). Sem sombra de dúvida, o trabalho de síntese de maior sucesso foi Chorley e Haggett (1967), traduzido para o português em 1975 e, ainda hoje, muito citado. Outros trabalhos nessa linha também merecem destaque, tais como Minshull (1975), Kirkby (1987) e Macmillan (1989). No Brasil, destaca-se o livro *Modelagem de Sistemas Ambientais* (Christofolleti, 1999), o qual foi, infelizmente, publicado após a morte do autor, um grande defensor da análise quantitativa na Geografia, especialmente aquela associada à análise de sistemas (Christofolleti, 1979; 1990). Embora esse livro represente um marco na produção bibliográfica nacional neste tema, possui uma abordagem muito descritiva deixando a ideia de que podemos modelar (ou mesmo analisar) sistemas ambientais sem compreender e discutir as equações envolvidas em tais simulações.

A modelagem vem sendo muito utilizada como ferramenta de análise nos diferentes campos da geografia física. Mais do que um objetivo final, ou seja, o de desenvolver modelos em si, na geografia física estes representam, em geral, instrumentos na busca de previsões de comportamentos, seja de cenários futuros ou pretéritos, nas mais variadas escalas espaciais e temporais (Christofolleti, 1982). Há vasta literatura destacando o uso de modelos em estudos teóricos e aplicados em vários campos da Pedologia (por ex., Hoosbeek e Bryant, 1992; Brooks e Richards, 1993; Pachepsky *et al.*, 2006; Minasny *et al.*, 2008; Vanwallegem *et al.*, 2013), da Climatologia (por ex., Wilks e Wilby, 1999; Viles e Goudie, 2003; Salmun e Molod, 2006; Donner e Large, 2008; Harrison *et al.*, 2016), da Biogeografia (por ex., Moorhead *et al.*, 1996; Jørgensen, 2008; Rovira e Rovira, 2010; Acevedo *et al.*, 2012; Baird, 2013), da Geomorfologia (por ex., Fernandes, 1996; Kirkby, 1996; Kirkby, 2003; Lawler e Fairchild, 2010; Parker *et al.*, 2011; Perron *et al.*, 2012), da Hidrologia (por ex., Kampf e Burges, 2007; Ranatunga *et al.*, 2008; Beven, 2012), entre outros. Da mesma forma, destacam-se estudos de modelagem na previsão e análise dos impactos associados a mudanças ambientais (por ex., Sohl e Sayler, 2008; Kettner e Syvitski, 2012), à expansão de áreas urbanas (por ex., Sunde *et al.*, 2016) e à previsão de desastres naturais (por ex., Borga *et al.*, 2014; Tonini *et al.*, 2014). O contínuo crescimento do uso da modelagem nas últimas décadas reflete, pelo menos em parte, a maior popularização e os avanços nas técnicas de computação, os avanços nas próprias técnicas de modelagem, o reconhecimento da necessidade do estudo dos sistemas ambientais de modo integrado, assim como um aumento na demanda de estudos de previsão (Mulligan e Wainwright, 2013).

O termo modelo pode ser usado tanto como adjetivo (significando um grau de perfeição), como verbo (significando simular, demonstrar ou representar como é alguma coisa) ou como substantivo (significando uma representação). Embora não haja consenso, dependendo do estudo realizado um modelo pode ser uma teoria, lei, hipótese, ideia, equação, entre outras coisas (Harvey, 1969; Minshull, 1975). Para Harvey (1969), modelos são instrumentos temporários para representar como nós pensamos que uma certa estrutura pode, ou deve, funcionar. Com tantas formas possíveis de modelos, a busca por uma definição rígida é pouco útil, podendo estes serem entendidos, de uma forma mais ampla, como estruturas simplificadas da realidade que supostamente apresentam (ou preservam) as suas características ou relações mais importantes. Dessa forma, devemos sempre ter em mente que não é a realidade em si que se encontra ali representada no modelo, mas sim a nossa visão do sistema em estudo e a maneira como percebemos e compreendemos essa realidade, o que define uma íntima relação entre o estágio de desenvolvimento da teoria e o poder de aplicação de um determinado modelo, assunto que voltaremos a discutir mais adiante.

Sistemas, Modelos e a Questão da Subjetividade

Existe certa confusão na literatura, especialmente na da geografia física, no uso dos termos sistemas e modelos, muitas vezes usados como sinônimos. De uma forma geral, um modelo simula o comportamento de um determinado sistema em análise. Embora a introdução das abordagens associadas à análise sistêmica tenham rapidamente se difundido na geografia física nas décadas de 1960 e 1970 (Chorley, 1962; Howard, 1965; Chorley e Kennedy, 1971; Bennett e Chorley, 1978), várias discussões ocorreram quanto as suas potencialidades e limitações (por ex., Phillips, J. D., 1992; Phillips e Renwick, 1992; Rodrigues, 2001; Egner e Von Elverfeldt, 2009). Posteriormente, aprofundaremos algumas dessas discussões neste artigo.

Durante o processo de modelagem, necessariamente, são feitas diversas hipóteses simplificadoras. Nessa etapa temos que evitar a inclusão de detalhes considerados “superfluos”, o que levaria a um aumento no gasto computacional que, em situações extremas, poderia até mesmo impedir a implementação numérica do modelo. Por outro lado, temos que evitar a exclusão de detalhes importantes, ou mesmo fundamentais, o que levaria à obtenção de soluções inadequadas do modelo. Dessa forma, como já destacado por Haggett e Chorley (1967), embora os modelos sempre sejam aproximações subjetivas de uma realidade, uma vez que não incluem todas as observações ou relações existentes (embora nem sempre conhecidas), estes são valiosos por obscurecerem detalhes acidentais e por permitirem o aparecimento dos aspectos mais relevantes da realidade em estudo. Ou seja, as simplificações feitas, embora necessárias, devem preservar as feições (ou relações) mais significativas observadas na realidade, de modo que um “bom modelo” deva ser, ao mesmo tempo, relativamente simples e suficientemente realístico (Barnes, 1995).

Isso nos remete ao conceito de parcimônia já que, como destacam Mulligan e Wainwright (2013), o melhor modelo tende a ser aquele que alcança o maior realismo com a menor complexidade de parâmetros. Mas afinal, o que é realismo em modela-

gem? Embora este seja um tema que gere grande discussão, de uma forma geral, medimos o realismo, sempre que possível, na etapa de validação do modelo, quando comparamos os valores estimados pelo modelo com aqueles medidos no mundo real. Como destacado por vários autores (por ex., Gauch Jr., 1993; Mulligan e Wainwright, 2013), o princípio da parcimônia é importante na modelagem porque a nossa capacidade de modelar a complexidade é maior do que a de gerar dados para parameterizar, calibrar e validar estes mesmos modelos sendo, portanto, interessante reduzir a complexidade ao mínimo necessário (Lancaster e Grant, 2003; Blöschl, 2006; Hill, 2006; Brasington e Richards, 2007; Murray, 2007; Nicholas e Quine, 2007).

Evidentemente, esse limite não é simples de ser definido pelo modelador e, embora a parcimônia seja um “norte” a ser buscado, a compreensão da complexidade do sistema modelado é, em geral, necessária para que os resultados obtidos possuam representatividade (Fatichi *et al.*, 2016). A decisão do que pode ser simplificado passa, entre outros aspectos, pelo nível de conhecimento teórico já alcançado e pela experiência que temos com o problema a ser modelado. Outro fator importante na definição dessas simplificações, refere-se aos objetivos a serem alcançados com a utilização do modelo. Por exemplo, enquanto em algumas situações queremos simular mudanças temporais que ocorrem no sistema (modelo transiente, envolvendo a variável tempo) em outras queremos apenas simular a condição final a ser alcançada na condição de equilíbrio (modelo *steady-state*, sem a presença da variável tempo). Outro fator importante a ser considerado quando definimos as simplificações a serem feitas refere-se à nossa capacidade de análise, seja em termos da resolução dos dados, do tamanho da área, das dimensões envolvidas (por ex., modelos de uma única dimensão -1D, 2D, 3D, 4D) ou dos recursos computacionais disponíveis. Nessa linha, a tendência é do desenvolvimento inicial de modelos mais simples, sendo, posteriormente, incorporadas novas informações e realizadas expansões, tornando-o gradativamente mais complexo (Meerveld e Weiler, 2008).

Outro ponto importante com relação à subjetividade dos modelos, como já destacado por (por ex., Mulligan e Wainwright, 2013), refere-se ao fato de que em muitos casos os próprios dados usados são, de fato, modelos. Em nossas mensurações e experimentos de campo utilizamos um grande quantidade de sensores que, de fato, já representam um modelo da realidade. Como exemplo temos o uso de tensiômetros e TDRs (*time-domain reflectometry*) para a medição do potencial matricial e o teor de água do solo, de sensores de nível de água para a estimativa da descarga fluvial, entre outros. Estes sensores estimam o potencial matricial, a umidade e a descarga através de modelos empíricos associados a curvas de calibração (lineares ou não) entre alguma propriedade e aquela que estamos interessados em medir (Strangeways, 2000). No caso da medição do potencial matricial da água do solo usando sensores do tipo Watermak (sensores de matriz granular), por exemplo, medimos a resistência elétrica do solo e como esta é influenciada pelo teor de água (Shock, 2003; Pereira *et al.*, 2006). Ou seja, o potencial matricial medido em campo que utilizamos em estudos de monitoramento e modelagem hidrológica (Fernandes *et al.*, 1994; Bertolino *et al.*, 2010), já representa, em si, um modelo de comportamento.

Essa discussão nos leva à necessária conclusão de que todos os modelos são subjetivos uma vez que é o modelador que irá definir quais informações, a partir das hipóte-

ses feitas, serão utilizadas, ou incorporadas, pelo seu modelo. Isso explica, pelo menos parcialmente, o grande número de modelos hoje existentes, propondo-se a simular um mesmo fenômeno. Um ótimo exemplo dessa situação é a modelagem da erosão dos solos, a qual pode incorporar, ou não, diferentes processos atuando em diversas escalas espaciais (por ex., parcelas, encostas, micro-bacias, regionais) e temporais (por ex., eventos isolados, médias mensais ou anuais, dezenas de anos ou mesmo centenas de milhares de anos, já em uma escala de evolução do relevo) (Nearing *et al.*, 2000; Aksoy e Kavvas, 2005). Como consequência, há um grande número de modelos se propondo a simular a erosão dos solos, cada qual com suas hipóteses simplificadoras, potencialidades e limitações (Foster, 1982; Kirchner *et al.*, 2001; Merritt *et al.*, 2003; Morgan e Nearing, 2011).

Um tema que merece reflexão é a proximidade destacada por alguns autores entre (a arte de) modelar e outras formas de arte (por ex., Dietrich *et al.*, 2003; Doherty, 2011; Mulligan e Wainwright, 2013). Dietrich *et al.* (2003) fazem uma excelente analogia entre diferentes tipos de pinturas e os principais tipos de modelos científicos hoje em uso. Nessa abordagem, os autores mostram pinturas descrevendo vários tipos de “realismos” (detalhado, aparente, estatístico e essencial) e fazem analogias com modelos detalhados e modelos simples, modelos em bases físicas e modelos empíricos de cunho estatístico, entre outros pontos. Para outros autores, a modelagem é uma arte com base racional que requer tanto o uso do senso comum quanto do conhecimento matemático, exigindo do bom modelador experiência, intuição e capacidade de abstração (Cross e Moscardini, 1985; Smith e Smith, 2007). Como destacado por Mulligan e Wainwright (2013), enquanto a intuição é uma habilidade que não pode ser ensinada, derivada da experiência individual, a capacidade de abstração é difícil de ser adquirida por adultos, os quais tendem a “complicar” demais as coisas. Nessa linha, estes autores apresentam um ótimo exemplo de como uma criança apresenta, de forma geral, uma elevada capacidade de generalização e simplificação, tão importante no desenvolvimento de modelos.

Por que Modelar?

Além de motivos associados a modismos passageiros, podem ser destacadas diversas razões para o uso da modelagem enquanto ferramenta científica. Na geografia física, em especial, nos deparamos com várias limitações nas mensurações, monitoramentos e experimentos de campo, as quais podem estar associadas, por exemplo, às escalas espaciais e/ou temporais utilizadas, aos custos envolvidos, a problemas de acesso, que fazem com que os modelos possam ser usados como complementos nessas investigações. Em estudos de cunho hidrológico, por exemplo, temos a necessidade de extrapolar os resultados de mensurações para outras bacias, seja por falta de mensurações ou pela necessidade de prever cenários futuros (Beven, 2012). Em geral, podemos pensar em pelo menos três situações distintas do uso de modelos em geografia física: na predição, na retrodição e no teste de hipóteses.

Modelos de Predição

Nesta classe, certamente o tipo mais comum, temos o grupo de modelos voltados para estudos de previsão, os quais simulam um determinado sistema visando, por exem-

plo, estimar o valor de uma variável em locais não amostrados, seja na escala espacial ou temporal, como fazem os modelos de interpolação. No caso de sistemas ambientais, muitos desses modelos buscam prever seu comportamento futuro. Podem ser usados, no caso de estudos hidrológicos, para prever a variação anual da descarga fluvial em uma bacia (Beven, 2012) ou para simular cenários futuros de alterações dessa descarga em resposta a mudanças no uso e cobertura (Marchioro *et al.*, 2011). Uma aplicação interessante desse tipo de modelo é simular os efeitos das práticas de manejo no avanço da frente de molhamento durante o processo de infiltração da água no solo (Ndiaye *et al.*, 2007). Em estudos hidrológicos, de forma geral, os modelos complementam as mensurações de campo, as quais possuem limitações associadas às técnicas empregadas, às escalas espaciais e temporais analisadas, além dos óbvios limites orçamentários uma vez que os custos dos sensores envolvidos nos monitoramentos são, quase sempre, muito elevados. Nesses estudos, a modelagem é uma ferramenta que permite extrapolar espacialmente os resultados obtidos para novas bacias, ainda sem dados mensurados em campo, ou mesmo extrapolar temporalmente visando caracterizar cenários hidrológicos futuros. Evidentemente, essa ideia está calcada em um tipo de uniformitarismo, onde assume-se que já temos um suficiente conhecimento do funcionamento do presente para estarmos habilitados a prever o futuro, o que certamente será sempre discutível (Furlani e Ninho, 2015).

Outro exemplo nessa linha de abordagem, refere-se a modelos que buscam prever a espessura do solo em um determinado local. Evidentemente, embora de grande aplicabilidade em diversas áreas (geomorfologia, biogeografia, agronomia, engenharia, etc.), modelos com tal objetivo não são simples simulando processos altamente complexos. Tais modelos simulam a atuação por tempos longos dos diversos processos envolvidos (por ex., intemperismo, erosão, incisão fluvial) e dão como resultado a distribuição espacial da espessura do solo na chamada condição de equilíbrio (Dietrich, 1995; Minasny e Mcbratney, 2001; Pelletier e Rasmussen, 2009; Rempe e Dietrich, 2014). Embora não fique óbvio para muitos usuários, o resultado desses modelos, ou seja, a espessura do solo, é obtida pela aplicação do conceito de conservação de massa, calculando para um certo local, o balanço entre as taxas de produção e de perda de solo.

Dentro dessa classe de modelos podemos destacar aqueles que simulam onde, e em algumas situações quando, determinados fenômenos irão ocorrer, como por exemplo os movimentos de massa, seja na forma de escorregamentos (por ex., Guimarães *et al.*, 2003; Fernandes *et al.*, 2004; Vieira *et al.*, 2010; Araújo *et al.*, 2012) ou de corridas de detritos (por ex., Gomes *et al.*, 2008; Gomes *et al.*, 2013). Evidentemente, por ser o tipo de abordagem mais comum no uso de modelos, muitos outros exemplos poderiam ser aqui discutidos.

A validação dos modelos de predição, em geral, é feita através da comparação dos resultados obtidos pelo modelo com aqueles obtidos através de mensurações e experimentos de campo. No entanto, em algumas situações, como no caso da predição de áreas sujeitas a movimentos de massa, a validação tem que ser feita através de outros métodos. Nesse exemplo, fica evidente que não podemos esperar a ocorrência (ou não) de um deslizamento na área definida como de alto risco para ter certeza que o modelo é confiável (Fernandes *et al.*, 2001).

Modelos de Retrodição

No segundo tipo de abordagem, temos modelos que desenvolvem atividades voltadas à retrodição, simulando condições que já não existem mais, ou seja, condições ambientais pretéritas. Essa abordagem pode ser incluída, pelo menos de forma indireta, na classe maior chamada de modelos inversos, onde queremos reconstruir algo no passado (por ex., uma forma de relevo, uma condição climática) a partir de feições e/ou processos observados atualmente. Dentro da geografia física, tais modelos são mais comuns na geomorfologia, estando associados a estudos dentro de uma abordagem histórica e, em muitos casos, a modelagem representa a única forma de voltarmos no tempo geológico. No Brasil, o mais comum é o uso de modelos qualitativos propondo, por exemplo, as relações entre processos e formas de relevo pretéritas, os efeitos de mudanças climáticas nas taxas de erosão e/ou deposição, como no modelo evolutivo proposto por (Bigarella *et al.*, 1965).

Com relação a modelos quantitativos, um exemplo clássico é a sua utilização da datação morfológica de terraços fluviais e escarpas de falhas (por ex., Nash, 1980; Nash e Beaujon, 2006) onde utiliza-se a forma do perfil topográfico, especialmente a sua curvatura, para se estimar a idade da feição ou evento original. Outro exemplo de retrodição engloba os diversos modelos matemáticos que foram gerados, desde a década de 1980, visando a simulação da evolução do relevo ao longo do tempo geológico. Inicialmente, esses modelos (LEMs - *Landscape Evolution Models*) focaram a simulação da evolução de perfis de encostas em duas dimensões (2D), englobando apenas poucos processos, tais como o escoamento superficial e o rastejo, testando a ideia de que havia uma relação direta entre o processo atuante e a forma resultante (Culling, 1960; 1965; Kirkby, 1971; Ahnert, 1976). Posteriormente, esses estudos passaram a analisar como as formas das encostas respondiam aos efeitos combinados do tipo de processo atuante e das condições de contorno predominantes, como por exemplo, a taxa de incisão fluvial atuante na base da encosta (Armstrong, 1987; Fernandes e Dietrich, 1997). Nas últimas décadas, esses LEMs passaram a simular a evolução de grandes áreas tridimensionalmente (modelos em 3D), englobando outros processos tais como escoamento superficial, rastejo, incisão fluvial, intemperismo, movimentos tectônicos (por ex., Ahnert, 1988; Howard, 1994; Willgoose, 2005; Codilean *et al.*, 2006; Tucker e Hancock, 2010). No Brasil, embora a aplicação de LEMs em estudos quantitativos de evolução do relevo seja ainda incipiente (Moreira *et al.*, 2008; 2009; 2012; Souza *et al.*, 2012), esses trabalhos foram capazes de simular a evolução de parte da escarpa da Mantiqueira ao longo do Cenozóico, obtendo taxas de recuo da ordem de 100 m Ma^{-1} , compatíveis com estimativas feitas por outras técnicas. Algumas das limitações associadas à utilização de modelos de retrodição em geomorfologia podem ser observadas em Paola (2013), especialmente aquelas voltadas para a questão do que podemos (e não podemos) reconstruir sobre sistemas pretéritos de transporte a partir dos depósitos hoje observados em campo.

Modelos e o Teste de Hipóteses

Uma terceira abordagem refere-se ao emprego de modelos no teste de hipóteses, conceitos e/ou ideias. Aqui os modelos representam ferramentas que nos ajudam a avan-

çar na compreensão do funcionamento de um certo sistema (Lawler e Fairchild, 2010). Nessa linha, podemos utilizar a modelagem, por exemplo, para examinar a importância relativa dos principais parâmetros e variáveis envolvidos nas simulações através de uma análise de sensibilidade (Smith e Smith, 2007; Mulligan e Wainwright, 2013), as relações existentes entre estes parâmetros/variáveis e os mecanismos de retroalimentação resultantes, sejam eles positivos (por ex., Cox *et al.*, 2000; Scanlon *et al.*, 2007) ou negativos (por ex., Scheingross e Lamb, 2016), a influência das escalas de análise envolvidas (por ex., Church e Mark, 1980), a influência da incorporação (ou da exclusão) de um determinado processo de transporte (por ex., Dietrich *et al.*, 2003), entre outros. Com frequência, a modelagem é a única forma que temos para testar tais hipóteses, uma vez que mensurações de campo ou experimentos com certas condições controladas (em campo ou em laboratório) se tornam impossíveis de serem realizados devido a limitações associadas à escala temporal (os processos envolvidos muitas vezes são muito lentos) e/ou espacial (os estudos envolvem grande áreas). Para muitos, esta terceira abordagem no uso de modelos é a mais nobre, representando importante etapa em estudos baseados no método hipotético-dedutivo (Christofolleti, 1999; Inkpen, 2005).

Um exemplo dessa linha de abordagem pode ser representado pelo uso de ferramentas de modelagem no teste da clássica hipótese sobre formas de relevo que já tenham alcançado um estágio de equilíbrio dinâmico, ideia inicialmente sugerida por Gilbert (1877) e posteriormente popularizada em meados do século XX por grandes nomes da geomorfologia (Strahler, 1950a; Hack, 1960; Hack, 1965; Howard, 1965; Ahnert, 1967). A ideia é que ao alcançarem a condição de equilíbrio dinâmico, as paisagens geomorfológicas estariam ajustadas à energia dos processos atuantes, de modo que as formas de relevo geradas seriam mantidas ao longo do tempo. Os modelos matemáticos que simulavam a evolução de perfis de encostas bidimensionais (2D), discutidos anteriormente, foram então utilizados para testar esse conceito, definindo as condições ambientais necessárias para que a condição de equilíbrio dinâmico, onde a forma não mais se modificava com o tempo, fosse alcançada (Ahnert, 1976; 1987).

Posteriormente, a modelagem foi usada para quantificar a escala de tempo necessária para que essa condição de equilíbrio fosse atingida em perfis de encostas, ou seja, o tempo de relaxação dessas formas de relevo (Allen, 1974; Brunsden e Thornes, 1979), conceito diretamente relacionado aos de estabilidade, sensibilidade e resiliência (Wolman e Miller, 1960; Wolman e Gerson, 1978; Owen *et al.*, 2011). Como o tempo de relaxação depende tanto da magnitude quanto da frequência das mudanças externas aplicadas ao sistema, Fernandes e Dietrich (1996) e Fernandes e Dietrich (1997) realizaram experimentos numéricos visando definir a ordem de grandeza desse tempo de relaxação para encostas convexas (formas meia laranja típicas) de vários comprimentos e sujeitas a diferentes amplitudes de modificações externas, seja de ordem climática (taxas de erosão) e/ou tectônica (taxas de incisão fluvial). Estes autores mostraram que os tempos de relaxação necessários para se atingir o equilíbrio eram mais longos do que a frequência das oscilações climáticas registradas no Quaternário. Segundo estes autores, tais resultados sugerem que os topos convexos das encostas, inicialmente sugeridos como formas em equilíbrio (Gilbert, 1909), podem representar, em certas condições ambientais bem específicas, formas em estágio de *quasi*-equilíbrio.

Embora a discussão sobre a existência de formas em equilíbrio ainda persista na geomorfologia (Phillips, J.D., 1992; Whipple, 2001; Bracken e Wainwright, 2006; Phillips, 2011), vários trabalhos utilizando modelos e mensurações de campo comprovaram a existência de paisagens geomorfológicas em equilíbrio dinâmico (ou *quasi*) nas escalas de perfis de encostas (por ex., Ahnert, 1987; Fernandes e Dietrich, 1997), bacia de drenagem (por ex., Reneau e Dietrich, 1991), ou mesmo em áreas maiores, já em uma escala regional (por ex., Brunsden e Lin, 1991; Stolar *et al.*, 2007; Cyr e Granger, 2008; Haghypour *et al.*, 2015; Han *et al.*, 2015). Esses trabalhos, de uma forma geral, inferem o alcance da condição de equilíbrio pela semelhança entre as taxas medidas (ou estimadas) de denudação e de soerguimento na região. De forma semelhante à utilização de modelos no teste do conceito de equilíbrio dinâmico, outros autores utilizam a modelagem para testar a chamada lei de *Playfair* em bacias de drenagem e como esta influencia os resultados gerados por modelos de evolução do relevo que atuam por tempos longos (Niemann *et al.*, 2001). Conceitos hidrológicos importantes, como o de conectividade e o de fluxos preferenciais, vêm também sendo investigados com a incorporação de modelos aos monitoramentos e experimentos de campo (Fryirs *et al.*, 2007; Reid *et al.*, 2007; Weiler e McDonnell, 2007).

Portanto, fica evidente que podemos avançar no nosso conhecimento sobre o funcionamento de um determinado sistema através da implementação de testes com modelos. Como destacado por Fenicia *et al.* (2008), podemos “aprender” com a contínua melhora dos modelos usados.

Tipologia de Modelos em Geografia Física

Como em outras áreas da ciência, a questão da tipologia de modelos na geografia é bastante complexa e confusa, uma vez que, com frequência, confunde-se, entre outras coisas, a temática do modelo com as características de sua organização interna. De fato, poucos avanços foram alcançados na questão da tipologia de modelos em geografia desde os esforços iniciais consolidados nas décadas de 1960 e 1970 (Chorley, 1964; Chorley e Haggett, 1967; Harvey, 1969; Minshull, 1975).

Nos textos de geografia física, principalmente na escassa literatura brasileira dentro do tema, ainda prevalece a classificação proposta faz quase meio século por (Chorley e Haggett, 1967), sem maiores adaptações ou discussões (Fernandes, 1996; Christofolletti, 1999; Vieira e Martins, 2016). É evidente que essa classificação geral já não mais se adequa aos estudos que vêm sendo realizados hoje, uma vez que nesses últimos 50 anos grandes avanços foram alcançados nas técnicas de modelagem e no nosso poder de computação, principalmente pela difusão e popularização de computadores de pequeno porte. Os termos utilizados por esses autores para classificar os quatro grupos de modelos propostos (conceituais, físicos, matemáticos e computacionais) já não se retratam as divisões observadas atualmente. Por exemplo, os modelos computacionais, ainda raros na década de 1960, são também modelos matemáticos, podendo ter um caráter empírico, determinístico ou estocástico, dependendo da situação, tema que será aprofundado mais adiante neste artigo. Da mesma forma, o grupo inicialmente chamado de modelos físicos (construídos usando escalas e/ou materiais diferentes) gera grande confusão na literatura, principalmente com relação aos clássicos modelos matemáticos determinísticos

desenvolvidos sobre bases físicas (Beven, 1989), amplamente utilizados em várias áreas do conhecimento científico.

Modelos Matemáticos

Os modelos matemáticos expressam as relações observadas em campo, seja com relação aos processos de transporte (por ex., escoamento superficial, rastejo, salpico, descarga fluvial) ou às feições morfológicas, através de equações matemáticas. A confusão discutida anteriormente no caso da classificação de modelos, na sua forma mais ampla, é também observada, embora em menor grau, na tipologia de modelos matemáticos. Chorley e Haggett (1967), em uma primeira tentativa de classificação dentro da geografia, a qual já faz cerca de cinco décadas, dividem os modelos matemáticos em empíricos, determinísticos e estocásticos. Essa divisão, embora possa ser considerada simples, sofreu poucas modificações desde então na geografia. Em outros campos da ciência, onde a modelagem matemática é bem mais usada como ferramenta de análise, classificações mais complexas podem ser encontradas.

Modelos Empíricos

Os modelos matemáticos empíricos não possuem suas relações derivadas de teorias ou leis físicas. Em geral, estes modelos refletem relações entre variáveis derivadas dos dados disponíveis, obtidos em mensurações, monitoramentos ou experimentos, seja de campo ou de laboratório. Essa abordagem foi a base da chamada revolução quantitativa da geografia física, e em especial da geomorfologia, que teve seu auge entre as décadas de 1950 e 1970, quando vários estudos quantitativos foram realizados na mensuração da morfometria de perfis de encostas (Strahler, 1956), de bacias de drenagem (Strahler, 1952b; Leopold e Maddock, 1953; Leopold e Miller, 1956; Chorley, 1957; Strahler, 1957), assim como em experimentos de laboratório simulando a evolução dos padrões de canais fluviais (Leopold e Wolman, 1957; Schumm e Khan, 1972), o processo de rastejo nas encostas (Kirkby, 1967; Van Steijn, 1977), e diferentes processos erosivos (Moeyersons e De Ploey, 1976; Mucher e De Ploey, 1977), entre outros.

A partir dos dados levantados nessas mensurações e experimentos são geradas, através de correlações estatísticas baseadas, em geral, em regressões lineares, relações matemáticas (funções) entre as chamadas variáveis independentes (em geral, distância, profundidade ou tempo) e dependentes (por ex., elevação, declividade, curvatura, taxa de erosão, umidade do solo). Os modelos gerados representam o melhor ajuste entre os dados obtidos, em geral na forma de funções lineares, potência, exponencial, entre outras. Os experimentos são realizados sob condições ambientais parcialmente controladas (Thomaz, 2013), como no caso do uso de simuladores de chuva em campo ou em laboratório (Coelho Netto, 1987; Fernandes *et al.*, 1989; Thomaz e Pereira, 2014). Alguns experimentos de laboratório, por sua vez, combinam modelos reduzidos e a substituição de materiais (uso de matérias com comportamentos reológicos similares) para modelar matematicamente os efeitos causados por fluxos granulares na incisão fluvial em canais com leito rochoso (Sklar e Dietrich, 2004; Hsu *et al.*, 2008).

Dentre as críticas levantadas aos modelos empíricos destaca-se a falta de bases físicas nas funções geradas entre as variáveis de entrada e as de saída estudadas, calcadas apenas em critérios estatísticos. Outra crítica importante, refere-se à menor capacidade de generalização, uma vez que as relações (modelos) obtidas possuem uma influência direta das condições ambientais reinantes naquela área de estudo. Assim, em geral, não podemos extrapolar esses modelos para outros locais, com características ambientais (clima, solos, relevo, geologia, cobertura, etc.) diferentes daquelas onde as funções empíricas foram determinadas, fazendo com que o modelo produzido tenda a ser específico para o banco de dados usado em sua geração. Para que possa ocorrer uma “transferência” espacial, ou seja, uma extrapolação dos modelos para outras áreas, torna-se necessário que ajustes sejam feitos nesses modelos, passando por uma nova “calibração” de alguns dos parâmetros envolvidos, em geral representados como constantes nessas funções preditivas, ou seja, representando um ajuste dos parâmetros às novas características locais. É de se esperar que a construção de modelos empíricos desse tipo ocorra apenas nas etapas iniciais de uma determinada pesquisa científica, especialmente em situações onde as bases teóricas existentes ainda sejam pouco sólidas. Em geomorfologia, essa abordagem foi muito utilizada nas décadas de 1950 e 1970, sendo também muito frequente no Brasil na década de 1970, impulsionada principalmente pelas pesquisas de Antônio Christofoletti.

Mais recentemente, especialmente nas últimas três ou quatro décadas, modelos empíricos com bases estatísticas mais complexas, como por exemplo redes neurais, lógica *fuzzy*, mineração de dados, sistemas especialistas, se tornaram frequentes dos diferentes campos da geografia física (por ex., Fischer, 1994; Mennis e Guo, 2009). Em geral, esses modelos buscam assinaturas, ou seja, certas combinações específicas de parâmetros, que refletem um determinado comportamento ou a ocorrência de um certo fenômeno. Modelos desse tipo são comuns, por exemplo, em estudos de previsão voltados para a determinação de áreas sujeitas à ocorrência de deslizamentos (por ex., Carrara *et al.*, 1991; Xavier da Silva, 1996; Van Westen *et al.*, 2008), e para a estimativa da umidade do solo em condições de campo (Elshorbagy e Parasuraman, 2008).

Modelos Determinísticos

Com relação à natureza dos dados, os modelos matemáticos podem ser divididos em determinísticos ou estocásticos. Nos modelos determinísticos os resultados gerados pelo modelo são uma consequência direta dos valores usados de entrada nas variáveis envolvidas, assim como das condições iniciais e de contorno (limites do problema modelado). Aqui as respostas geradas pelos modelos serão sempre as mesmas desde que que os dados de entrada permaneçam os mesmos. Ou seja, nos modelos determinísticos os valores numéricos dos *inputs* determinam aqueles que serão obtidos nos *outputs*.

Os modelos determinísticos são desenvolvidos a partir do conhecimento acumulado das relações existentes entre as variáveis envolvidas no sistema modelado (**modelos determinísticos com base empírica**) ou a partir de leis físicas que refletem o comportamento do sistema (**modelos determinísticos com bases físicas**). Esse último grupo tem ganho grande importância nas últimas décadas por se preocupar em desenvolver modelos que

simulem, o máximo possível, o comportamento físico do sistema (por ex., Beven, 1989; Dietrich *et al.*, 2003; Fatichi *et al.*, 2016).

Fazendo uma relação com a clássica ideia de modelos do tipo caixa preta, caixa cinza e caixa branca (Kirkby *et al.*, 1987), a qual é baseada no grau de conhecimento existente sobre o funcionamento interno do sistema estudado, os modelos empíricos podem ser considerados do tipo caixa preta, uma vez que podemos prever a resposta mas não entendemos o seu funcionamento interno. Já os modelos desenvolvidos com bases físicas, por sua vez, podem ser considerados do tipo caixa cinza ou mesmo caixa branca, dependendo do quanto conhecemos, ou achamos que conhecemos, sobre as relações internas do modelo.

Um exemplo de modelo determinístico com base empírica é a Equação Universal de Perda de Solo (Wischmeier *et al.*, 1958; Wischmeier e Smith, 1965; Peterson e Swan, 1979), cuja simplicidade matemática fez com se tornasse uma das equações mais usadas na literatura. No entanto, essa “facilidade” a tornou também famosa por seus usos e abusos (Wischmeier, 1976; Schertz, 1978; Govers, 2011), tendo sido muitas vezes utilizada para estimar taxas de erosão derivadas de processos diferentes daqueles para os quais ela foi desenvolvida (erosão laminar), chegando muitas vezes a ser utilizada para estimar taxas de erosão por voçorocamento. Mesmo assim, conforme destacado por Nearing *et al.* (2000), por ter sido gerada a partir de um banco de dados gigantesco, derivado de experimentos de campo com milhares de parcelas de erosão espalhadas sob diversas condições ambientais, esta apresenta bons resultados.

Um fato muito importante associado aos modelos determinísticos desenvolvidos sobre bases físicas é que, de um modo geral, estes possuem um poder de generalização maior do que os modelos empíricos. Isso permite utilizar o modelo em áreas diferentes daquelas onde ele foi gerado, requerendo apenas o conhecimento dos valores numéricos locais das variáveis envolvidas (por ex., textura, porosidade, precipitação, umidade do solo, permeabilidade, coeficiente de difusão do relevo, taxa de erosão, entre outras).

Nessa abordagem, busca-se modelos globais que descrevem o comportamento das relações (físicas, químicas ou mecânicas) envolvidas, e em campo procura-se determinar os valores numéricos das propriedades envolvidas, seja na forma de constantes ou de variáveis (no espaço e/ou tempo). Para muitos autores, essa é uma das grandes vantagens dos modelos determinísticos com bases físicas, uma vez que quando o modelo não apresenta bons resultados podemos voltar nele, repensar as relações (equações) implementadas (modificando-as ou até mesmo substituindo-as), repensar os valores numéricos atribuídos às variáveis, entre outras atividades. Uma desvantagem geralmente associada aos modelos matemáticos desenvolvidos sobre bases físicas refere-se ao fato de que eles tendem a ser mais complexos, tanto em termos das relações internas descritas quanto das equações matemáticas utilizadas. Vale aqui lembrar que, matematicamente, quando descrevemos a modificação de uma variável em relação a uma outra, estamos lidando com derivadas. Na geografia física, em especial, isso quase sempre é a regra uma vez que estamos estudamos o comportamento de uma variável ao longo do espaço (por ex., a variação da elevação com a distância ao longo de uma encosta, ou seja, a declividade) ou no tempo (por ex., a variação temporal da umidade no topo do solo). Sendo assim, as relações implementadas nesses modelos desenvolvidos com bases físicas envolvem,

na maioria das vezes, derivadas (totais e ou parciais) com soluções obtidas através de métodos numéricos (diferenças finitas, elementos finitos) escritas em linguagens computacionais, tais como C++, Fortran ou MATLAB (por ex., Smith e Smith, 2007; Giordano *et al.*, 2009).

Ainda dentro da linha de erosão dos solos, podemos citar como exemplos de modelos matemáticos determinísticos desenvolvidos, totalmente ou parcialmente, sobre bases físicas os modelos WEPP - *Water Erosion Prediction Project* (Nearing *et al.*, 1989) e SWAT – *Soil and Water Assessment Tool* (Arnold e Srinivasan, 1998). Embora esses dois modelos simulem a erosão dos solos de formas bem distintas, possuem em comum a descrição a partir de bases físicas dos principais processos envolvidos, como por exemplos as equações de transporte de água e de sedimentos. Vários estudos vêm sendo realizados no Brasil utilizando com sucesso os modelos WEPP (por ex., Chaves, 1994b; Guerra e Silva, 2011) e SWAT (por ex., Marchioro *et al.*, 2011; Fukunaga *et al.*, 2015).

Modelos Estocásticos

Nos modelos estocásticos há a inclusão de eventos aparentemente aleatórios (ou randômicos), que possuem uma certa chance, ou probabilidade, de ocorrência, permitindo a consideração das incertezas (Nelson, 1995; Renard *et al.*, 2013). Nessas situações, flutuações randômicas nos processos e variáveis do sistema tendem a limitar a utilização de modelos com bases determinísticas. Assim, o valor numérico de uma determinada variável reflete uma determinada probabilidade de ocorrência. Como consequência, duas simulações com os mesmos valores de entrada nas variáveis podem fornecer respostas de saída (resultados) diferentes. Várias são as razões que podem ser atribuídas a essas variações randômicas, incluindo processos realmente aleatórios e processos não-aleatórios, mas que são considerados assim por erro ou por falta de conhecimento. De uma forma geral, modelos preditivos que incluem a atuação de eventos de precipitação, como por exemplo modelos de erosão, de movimentos de massa, de vazão fluvial, se encaixam bem na ideia de modelos estocásticos (Dunne, 1991). Alguns programas computacionais de modelagem da erosão dos solos, como por exemplo o WEPP e o SWAT discutidos anteriormente, possuem módulos específicos para a geração de eventos de precipitação nas simulações. Para uma discussão mais profunda sobre as bases teóricas desses modelos geradores de condições climáticas ver Wilks e Wilby (1999). Evidentemente, a utilização de modelos determinísticos ou estocásticos dependerá de vários fatores envolvendo o tipo e grau de conhecimento sobre problema a ser modelado, sua complexidade e escalas de análise, assim como questões subjetivas ligadas às preferências de escolha do usuário (Renard *et al.*, 2013).

Modelos Distribuídos e Concentrados

Uma outra abordagem de classificação de modelos matemáticos, muito importante para modelos que envolvem a espacialização de processos hidrológicos e/ou erosivos, separa os modelos de acordo com a forma como eles tratam essa variação espacial dos dados. Com base nesse critério, os modelos podem ser divididos em distribuídos, con-

centrados e, em certos casos especiais, semi-concentrados (Beven, 1992). Os **modelos distribuídos** (*distributed*) incorporam em suas análises as variações espaciais envolvidas nas simulações, sejam elas ligadas às propriedades dos solos, à precipitação, aos tipos de uso e cobertura, etc. Em modelos que trabalham dentro de um ambiente SIG, isso quer dizer que os valores numéricos dos parâmetros e variáveis estudadas podem ser atribuídos, de forma independente, para cada célula dentro do *grid*. De uma forma geral, os modelos desenvolvidos sobre bases físicas tendem a ser, também, modelos distribuídos.

Os **modelos concentrados** (*lumped*), por sua vez, não conseguem incorporar essas variações espaciais, tratando tudo através de valores médios. Nessa abordagem, em modelos que trabalham na escala de bacia hidrográfica, por exemplo, teremos valores constantes em toda a bacia para um certo parâmetro (por ex., precipitação, espessura do solo, teor de matéria orgânica). Entre esses dois extremos podemos ter modelos considerados como semi-concentrados, nos quais parte da área modelada é tratada de forma distribuída enquanto parte de forma concentrada, ou quando consideramos a variação espacial de apenas parte dos parâmetros envolvidos na simulação, tratando outros parâmetros, em geral de mais difícil análise ou obtenção em campo, de forma concentrada.

Modelos de previsão de áreas sujeitas a deslizamentos em escala de bacia, com frequência, trabalham de forma semi-concentrada. Por exemplo, Guimarães *et al.* (2003), Fernandes *et al.* (2004) e Vieira *et al.* (2010) trabalham os parâmetros declividade e curvatura de forma distribuída, enquanto o parâmetro espessura de solo é tratado de forma concentrada, ou seja, constante em toda a bacia. Abordagem semelhante é feita pelo modelo precipitação-vazão SWAT quando este subdivide a bacia hidrográfica analisada em sub-bacias, chamadas de unidades hidrológicas representativas (HRUs), dentro das quais os parâmetros de solo, por exemplo, são tratados de forma concentrada, ou seja, são considerados constantes (Marchioro *et al.*, 2011). Evidentemente, embora a utilização de modelos distribuídos seja cientificamente a mais interessante, problemas associados à complexidade do sistema, à escala utilizada, ao estágio do conhecimento sobre o problema, aos altos custos envolvidos na obtenção dos dados, entre outros, poderão fazer com que as pesquisas utilizem modelos semi-concentrados ou mesmo concentrados.

A influência da escala na escolha do modelo mais adequado a ser usado é um tema muito relevante. O modelador precisa estar atento às escalas (espaciais e temporais) onde as relações obtidas entre as variáveis estudadas, seja através de mensurações ou experimentos, permanecem válidas. Na geografia física sabemos que, de uma forma geral, diferentes processos operam em diferentes escalas, ou domínios espaço-temporais. A extrapolação desses limites, ou seja, a utilização de um modelo em faixas espaciais ou temporais, acima (ou abaixo) daquelas onde os dados foram obtidos, levará a resultados equivocados. Nesses casos, a culpa não será do modelo em si, mas do modelador por não ter respeitado os seus limites de validade, representando mais um exemplo de uso inadequado de um modelo.

Modelos Transientes e de Equilíbrio (steady-state)

Os modelos matemáticos podem também ser classificados de acordo como eles tratam a variável “tempo” nas simulações. Os modelos transientes representam simulações

que variam com o tempo, ou seja, que tratam a variável tempo explicitamente em suas equações. Os modelos em equilíbrio, também chamados de modelos tipo *steady-state*, por sua vez, não incluem a variável tempo em suas análises. Evidentemente, modelos transientes são matematicamente mais complexos do que os de equilíbrio.

De um modo geral, na geografia física queremos sempre trabalhar com modelos transientes uma vez que os processos analisados tendem a variar com o tempo. Seguindo essa lógica, modelos de equilíbrio irão produzir visões aproximadas do comportamento do sistema, dentro de uma abordagem reducionista, devendo ser evitados ao máximo. No entanto, em muitas situações modelos de equilíbrio podem ser muito úteis em estudos ambientais. Esse é o caso do modelo SHALSTAB, um dos mais utilizados em todo o mundo para se estimar a localização espacial de áreas susceptíveis a deslizamentos (Montgomery, 1994; Dietrich, 1995; Dietrich e Montgomery, 1998; Guimarães *et al.*, 2008). Esse modelo não simula, por exemplo, o processo de infiltração da água para o interior do solo durante um evento pluviométrico, aumentando continuamente a poro-pressão positiva da água do solo e diminuindo sua resistência ao cisalhamento. O modelo SHALSTAB é um modelo tipo *steady-state* porque não trabalha com a variável tempo, simulando apenas a máxima poro-pressão que ocorrerá durante um determinado evento pluviométrico. Mesmo não considerando a variação temporal da poro-pressão da água do solo, esse modelo é muito útil por ser matematicamente simples e simular a situação mais crítica em termos hidrológicos, ou seja, o pior cenário possível em termos de estabilidade da encosta (Fernandes *et al.*, 2004). Esse é um bom exemplo de que, em certas situações, modelos de equilíbrio que possuem estruturas matemáticas bem mais simplificadas, decorrentes de uma abordagem reducionista, podem ser muito úteis na análise de sistemas ambientais.

Parametrização, Calibração, Validação e Verificação

Existe ainda certa confusão na literatura quanto ao significado desses termos, em especial naquela associada à geografia física. A parametrização refere-se à etapa onde o modelador define os valores numéricos a serem utilizados em cada um dos parâmetros e variáveis do modelo naquela simulação. De um modo geral, nos modelos usados em geografia física esses valores são obtidos na literatura ou em estudos envolvendo mensurações, monitoramentos e/ou experimentos, seja em campo ou em laboratório. Sabemos, no entanto, que em muitos casos, a coleta desses dados em campo possui muitas limitações associadas a dificuldades de acesso, ao tempo (duração) necessário para as medições ou mesmo aos custos envolvidos, os quais podem ser muito elevados devido aos equipamentos e às frequentes idas a campo.

Um outro fator que tem se tornado importante e que gera limitações à parametrização, especialmente em modelos implementados em *grids*, refere-se ao fato de que, cada vez mais, temos a nossa disposição modelos digitais de elevação (MDTs), ou seja, representações da topografia, de alta resolução (por ex., 10m, 5m, 2m). No entanto, a nossa capacidade de amostragem e análise dos parâmetros em campo não avança na mesma velocidade. Isso faz com que, na maioria dos casos, não tenhamos medições dos parâmetros na quantidade que gostaríamos (Mulligan e Wainwright, 2013). Conforme

destacado por Beven (1992), no caso de modelos hidrológicos, em especial aqueles chamados de modelos precipitação-vazão, a sofisticação dos MDEs ultrapassou rapidamente a nossa capacidade de parametrização. Como consequência, muitos dos modelos hidrológicos considerados como distribuídos continuam, na prática, sendo modelos concentrados. Essa discussão nos remete de volta à questão da sensibilidade dos parâmetros de um modelo, discutida aqui anteriormente, uma vez que a melhor estratégia deva ser a de privilegiar a obtenção em campo dos parâmetros mais relevantes para o modelo, ou seja, aqueles que mais influenciam na sua resposta.

A etapa de calibração, quando necessária no modelo, refere-se à obtenção dos valores numéricos de parâmetros do modelo que não podem ser obtidos diretamente, como discutido acima. Esta etapa tende a ser mais frequente em modelos empíricos e concentrados. Nos modelos desenvolvidos com bases físicas e nos modelos distribuídos, essa etapa tende a ser minimizada. De um modo geral, como lembrado por Mulligan e Wainwright (2013), os parâmetros de calibração de um modelo devem ser, sempre que possível, aqueles sem significado físico e o banco de dados usado para a calibração deverá ser diferente daquele que será usado, posteriormente, na etapa de validação.

A validação é uma etapa importante uma vez que tende a definir o sucesso de um determinado modelo. De modo geral, a validação de um modelo é feita, sempre que possível, pela comparação do valor estimado com o medido para um certo parâmetro escolhido. No entanto, como os modelos possuem com frequência vários parâmetros e variáveis, pode ocorrer uma certa subjetividade na escolha daquele que será utilizado na validação. Como colocado por Mulligan e Wainwright (2013), os parâmetros e variáveis a serem usados na etapa de validação de um modelo devem ser aqueles que representam o propósito principal de resultado do modelo, ou seja, o objetivo final da modelagem definido pela variável de saída do modelo. A escolha do parâmetro correto para a validação é importante, mas, por si só, ainda não é uma garantia de que este relativo sucesso do modelo tenha sido obtido pelas razões corretas. Conforme destacado no hoje clássico artigo de Kirchner (2006), uma boa previsão não é garantia de boa explicação, de modo que um bom modelo deve gerar boas previsões pelas razões corretas. Um elevado acerto na comparação entre o medido e o estimado, por exemplo em um modelo de previsão da descarga em uma bacia, pode ter sido alcançado pela combinação específica dos parâmetros e variáveis usada na simulação. De modo a garantir que o modelo esteja indo além do apenas gerar boas previsões (como se isso fosse pouco!), alguns autores sugerem que se faça uma validação também com alguma outra variável interna (Mulligan e Wainwright, 2013).

Dependendo do fenômeno que esteja sendo modelado não temos como fazer uma validação pelo método tradicional, discutido acima, comparando o resultado estimado com o medido. Esse é o caso de modelos voltados para a predição de áreas susceptíveis a deslizamentos. Esses modelos, de um modo geral, produzem como resultado um mapa com a distribuição espacial das áreas críticas, hierarquizadas com base em algum critério, como por exemplo o cálculo do fator de segurança em cada célula do *grid* estudado (por ex., Fernandes *et al.*, 2001; Guimarães *et al.*, 2003; Fernandes *et al.*, 2004; Gomes *et al.*, 2005; Vieira *et al.*, 2010; Gomes *et al.*, 2013). Nesse caso, não temos como esperar a ocorrência de um deslizamento para que a validação possa ser feita, confirmando que ali

tínhamos uma área crítica. Em modelos de movimentos de massa, a etapa de validação (ou de verificação, como chamada por alguns autores) é geralmente feita comparando-se as áreas definidas como críticas com um banco de dados de eventos pretéritos na área (mapa de cicatrizes de deslizamentos), assumindo-se que se uma área já deslizou é porque era crítica, ou seja, de elevada susceptibilidade. Aqui, de forma semelhante a discutida para modelos hidrológicos, podemos ter modelos com elevado grau de acerto, sem que necessariamente representem “bons modelos”. É comum observarmos modelos que, durante a fase de definição das classes de susceptibilidade, “exageram” nas áreas definidas como de alta susceptibilidade, gerando, como consequência, um alto grau de acerto quando comparadas com as cicatrizes de deslizamentos antigos. Evidentemente, um modelo de susceptibilidade a deslizamentos que possui um excesso de classes “vermelhas” (em detrimento de outras classes) possui pouca utilidade para um gestor público.

Em várias outras situações, também não é possível realizar a validação de um modelo, seja porque não temos como mensurar todas as variáveis envolvidas, porque não temos como acessar todos os pontos para coleta amostras (por ex., áreas distantes, íngremes e sob densa vegetação) ou porque ocorrem limitações devido ao refinamento das escalas espaciais e/ou temporais envolvidas. Nesses casos, onde uma validação rígida está prejudicada, busca-se formas alternativas que garantam, pelo menos, que o modelo passe por etapas de verificação. Uma solução empregada com frequência é a verificação dos resultados com aqueles obtidos por outros modelos já consagrados. Há um grande número de textos voltados para a revisão dos métodos utilizados na avaliação de modelos ambientais (Beck *et al.*, 1993; Calver e Cammeraat, 1993; Oreskes *et al.*, 1994; Kirchner *et al.*, 1996; Hoey e Bishop, 2003; Iverson, 2003; Willgoose *et al.*, 2003; Cox, 2006; Jakeman *et al.*, 2006; Piñeiro *et al.*, 2008; Bredehoeft, 2010; Matthews *et al.*, 2011). Por último, deve-se destacar que a etapa de validação, ou mesmo de verificação, representa etapa fundamental no emprego de modelos na investigação científica de fenômenos naturais. Infelizmente, ainda é comum na geografia física a apresentação de trabalhos em congressos, ou mesmo a publicação de artigos, onde os resultados dos modelos não são validados. Como destacado por Mulligan e Wainwright (2013), modelos não validados são tão bons quanto hipóteses não testadas.

O nosso poder de validação de modelos está diretamente associado aos erros e incertezas existentes na pesquisa, seja na etapa de coleta das informações (por ex., cartas topográficas, imagens, mensurações e experimentos de campo, etc.), na de tratamentos dos dados ou mesmo na de modelagem. Embora esse tema não venha a ser abordado neste trabalho, deve-se ter em mente que há várias fontes possíveis de erros e incertezas que precisam ser levadas em consideração para que se alcance uma efetiva validação dos resultados obtidos pelos modelos (Refsgaard *et al.*, 2007; Weiler e McDonnell, 2007; Beven, 2013; Di Baldassarre *et al.*, 2016; Refsgaard *et al.*, 2016).

Alguns Problemas e Desafios

Embora grandes avanços tenham ocorrido no uso de modelos ao longa das últimas décadas, alguns problemas e desafios existem e precisam ser enfrentados para que a ferramenta modelagem possa ser efetivamente utilizada na geografia física.

Modelagem e Metodologia Científica

Um desafio, diretamente associado aos procedimentos de metodologia científica, refere-se à necessidade de uma maior reflexão teórica por parte daqueles que usam, ou pretendem usar modelos. Para o usuário comum da geografia física, o desenvolvimento do modelo, ou mesmo o seu uso, não representa a etapa final do trabalho, mas sim uma ferramenta auxiliar para se alcançar os objetivos da pesquisa. No entanto, observa-se uma falta de interesse em tentar compreender como o modelo escolhido funciona, ou seja, como ele se propõe a simular o fenômeno, quais as suas hipóteses e o significado delas em termos da interpretação dos resultados alcançados. Com frequência, observamos usuários que se limitam a rodar o modelo e a apresentar os resultados, sem desenvolver uma discussão mais profunda sobre o significado científico deles. Paralelamente, para que o usuário consiga tirar o máximo proveito da ferramenta modelagem é necessário que ele adquira uma visão crítica do modelo em uso, conhecendo no detalhe suas bases conceituais, as escalas espaciais e temporais mais adequadas para a sua implementação, os parâmetros e variáveis que são mais relevantes, assim como as suas principais potencialidades e limitações.

Já que a modelagem pode ser vista como uma ferramenta voltada para o teste de hipóteses, para ultrapassar alguns desses desafios torna-se necessário que o usuário da geografia física rompa a tendência que tem de desprezo por maiores discussões sobre os métodos de pesquisa. Para que os modelos possam ser usados no teste de hipóteses o usuário precisar ter, efetivamente, uma(s) hipótese(s) associada(s) ao seu trabalho. Infelizmente, sabemos que nem sempre isso acontece pois ainda há um empirismo excessivo nas pesquisas que vêm sendo conduzidas na geografia física. Nessa mesma linha, vemos com frequência que muitos alunos de pós-graduação possuem apenas um “tema” de pesquisa e não uma “tese”, o que impede a geração de hipóteses que possam ser posteriormente testadas.

Na geografia física, em especial, este problema se reflete também na importância excessiva dada à área de estudo, uma vez que muitas vezes vemos uma inversão de valores, onde a área de estudo parece ser mais importante do que o tema a ser estudado. Isso se torna evidente quando nos deparamos com artigos que começam falando da área e não da questão central do trabalho. O fato é que sem essa maior rigidez teórico-metodológica, não teremos pesquisas com questões específicas bem definidas, o que impedirá a sugestão de hipóteses que poderão ser testadas através da implementação de modelos.

Para que mais dados?

Um outro problema que limita o avanço do uso da modelagem na geografia física parece estar associado à qualidade das mensurações, monitoramentos e experimentos de campo. Torna-se necessária uma maior reflexão sobre a representatividade dessas mensurações, tanto no espaço quanto no tempo. Com frequência, observa-se que as mensurações de campo são feitas em escala temporal diferente daquela relevante para os processos estudados (Sidle, 2006). Muitas vezes o sentimento que é passado durante apresentações de trabalhos em eventos é o seguinte: “fui ao campo e medi isso...”.

Evidentemente, isso limita a utilização combinada de mensurações e modelos na investigação dos sistemas (por ex., Thomaz, 2013; Blue e Brierley, 2016).

Além de problemas associados à qualidade das mensurações, há também outro problema ligado a uma tendência de diminuição, pelo menos em termos relativos, na quantidade dessas medidas feitas em campo (Sidle, 2006; Church, 2013), reduzindo a nossa compreensão dos processos atuantes a partir de observações diretas realizadas em campo. No entanto, como já argumentado aqui, a modelagem não deve ser vista como um substituto à observação. Embora trabalhar com modelos computacionais no laboratório seja, para muitos, mais atrativo do que sujar as botas em cansativos trabalhos de campo, não devemos, como destacado por Klemes (1997), colocar a “*carroça da modelagem*” na frente dos “*cavalos da observação*”. Embora os modelos tenham avançado muito nas últimas décadas eles continuam, e continuarão a precisar dos dados de campo (Silberstein, 2006; Soulsby *et al.*, 2008).

Equifinalidade e Incertezas

Uma discussão importante em estudos de modelagem, especialmente na geografia física, está associada ao conceito de equifinalidade, o qual sugere que, de forma geral, um sistema pode alcançar um determinado estágio final partindo de diferentes condições iniciais e/ou através da atuação de diferentes processos. Esse princípio, embora possa não parecer, assume grande importância em estudos ligados à aplicação de modelos, especialmente aqueles de cunho hidrológico, uma vez que permite que um ótimo ajuste entre modelo e dados seja alcançado (validação) a partir de várias combinações dos parâmetros internos (Beven, 1996). Isso torna-se importante uma vez que um modelo pode acertar uma previsão através de várias combinações de parâmetros.

Em estudos ligados à geomorfologia, por sua vez, o conceito de equifinalidade, originalmente introduzido por Culling (1957) e Chorley (1962), tem sido utilizado de uma forma um pouco diferente. Aqui, entende-se que feições de relevo similares podem ser geradas a partir de diferentes formas (condições) iniciais e/ou diferentes processos geomorfológicos controladores. Embora diversas discussões tenham sido travadas sobre os limites na aplicabilidade desse princípio (por ex., Haines-Young e Petch, 1983; Culling, 1987; Beven, 2006), é evidente a sua relação com a implementação de modelos, especialmente na questão da definição das incertezas associadas aos resultados gerados (Beven, 1996; Caers, 2011; Beven, 2015), gerando implicações importantes em estudos aplicados à reconstrução paleoambiental baseados na análise da topografia (por ex., Nicholas e Quine, 2010).

Considerações Finais

Embora o uso da modelagem na geografia física tenha crescido muito nas últimas décadas, alguns avanços precisam ser alcançados de modo a tornar os resultados obtidos mais confiáveis e representativos dos sistemas ambientais modelados. Dentre estes avanços, foram aqui discutidas a necessidade de uma visão mais crítica dos métodos científicos empregados, de uma melhora na qualidade e quantidade das mensurações e experimentos de campo, de uma constante preocupação com os conceitos de parcimônia e equifinalidade, de validar os modelos sempre que possível, entre outros.

A avaliação de modelos feita apenas pela comparação entre os resultados obtidos e os dados medidos pode ser problemática, como discutido para modelos hidrológicos e de susceptibilidade a deslizamentos. Vimos que podemos ter modelos com elevado grau de acerto, sem que necessariamente representem “bons modelos”. Para que o modelador possa ter esse poder de análise ele precisa se dedicar para compreender o modelo e o sistema em análise. Caso contrário, ele será apenas um “piloto de *software*”.

As discussões aqui colocadas atestam que a modelagem pode ser utilizada como ferramenta de aprendizado do funcionamento dos sistemas ambientais. Nessas situações, o modelo vai evoluindo continuamente, aumentando gradativamente sua complexidade ao longo do tempo, e nosso conhecimento sobre os processos que controlam o funcionamento do sistema vai se tornando mais amplo (Zheng *et al.*, 2006; Fenicia *et al.*, 2008; Lawler e Fairchild, 2010). Uma maior difusão no uso de modelos na geografia física requer, no entanto, uma expansão no conhecimento e na utilização dos métodos quantitativos disponíveis (Keylock e Dorling, 2004; Manduca *et al.*, 2008; Wenner *et al.*, 2009), assim como dos qualitativos (Yeager e Steiger, 2013). Algumas iniciativas nessa direção, seja na forma de painéis, laboratório virtuais ou de ferramentas computacionais interativas vêm sendo propostas e difundidas (por ex., Beven *et al.*, 2012; Campbell *et al.*, 2013; Neves *et al.*, 2013).

Da mesma forma que realizar mensurações, em campo ou laboratório, não é uma garantia de que estejamos fazendo ciência (Blue e Brierley, 2016), utilizar modelos na análise de problemas ambientais, semelhantemente, não é uma garantia de que estejamos avançando no conhecimento científico sobre aquele tema. Devemos ter em mente que modelar não deve ser visto como sinônimo de prever o futuro. Ao invés de garantia da resposta correta, conforme destacado por Doherty (2011), um bom modelo deve garantir que a resposta correta esteja entre os seus limites de incerteza, fazendo com a modelagem seja mais uma expressão científica de nossa ignorância do que uma afirmativa do conhecimento que ainda não possuímos.

Agradecimentos

O autor agradece a William Dietrich (Universidade da Califórnia, Berkeley) por ter aberto o caminho percorrido nos estudos de modelagem, tanto no campo teórico quando aplicado. As discussões sobre modelos realizadas com os colegas do Programa de Pós-Graduação em Geografia da UFRJ foram de grande aprendizado, em especial com Roberto Lobato Corrêa, Maria Célia Nunes Coelho, Iná Elias de Castro, Maria Naíse de Oliveira Peixoto e Paulo César da Costa Gomes. O autor agradece a Telma Mendes da Silva, João Paulo de Araújo, Lúcia Maria da Silva, Maria Fernanda Affonso Penna e Mari-za Ramalho Franklin pelos comentários e revisão do texto.

Referências Bibliográficas

ACEVEDO, M. A.; MARCANO, M.; FLETCHER JR, R. J. A diffusive logistic growth model to describe forest recovery. *Ecological Modelling*, 244, 13-19, 2012.

AHNERT, F. The role of the equilibrium concept in the interpretation of landforms of fluvial erosion and deposition. In: *L'Evolution des Versants*. MACAR, P. (Ed.). Liège: Université De Liège, 23-41, 1967.

_____. Quantitative slope models. *Zeist. Geom. Supplementband*, 25, 1976.

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

_____. Modelling landform change. In: *Modelling Geomorphological Systems*. ANDERSON, M. G. (Ed.). New York: John Wiley, 375-400, 1988

AKSOY, H.; KAVVAS, M. L. A review of hillslope and watershed scale erosion and sediment transport models. *Catena*, 64(2-3), 247-271, 2005.

ALLEN, J. R. L. Reaction, relaxation and lag in natural sedimentary systems: general principles, examples and lessons. *Earth-Science Reviews*, 10, 263-342, 1974.

ARAÚJO, J. P. C., SILVA, L. M., ALVEAR, M. L. S., ARRAES, T., DOURADO, F. e FERNANDES, N. F. Análise Morfométrica de Escorregamentos na Região Serrana do Estado do Rio de Janeiro: O Estudo de Caso da Bacia Hidrográfica do Córrego D'Antas. *Anais do 9º SINAGEO - Simpósio Nacional de Geomorfologia*, Rio de Janeiro, UGB, 1-5, 2012.

ARMSTRONG, A. C. Slopes, boundary conditions, and the development of convexo-concave forms - some numerical experiments. *Earth Surf. Proc. & Landf.*, 12, 17-30, 1987.

ARNOLD, J. G.; SRINIVASAN, R. A continuous catchment-scale erosion model. In: *Modelling soil erosion by water*. BOARDMAN, J. e FAVIS MORTLOCK, D. (Ed.). Berlin: Springer Verlag, 413-427, 1998.

BAIRD, A. J. Soil and Hillslope (Eco)Hydrology. In: *Environmental Modelling: Finding Simplicity in Complexity*. WAINWRIGHT, J. e MULLIGAN, M. (Ed.). Wiley-Blackwell, 165-181, 2013.

BARNES, C. J. The art of catchment modeling: What is a good model? *Environment International*, 21, 5, 747-751, 1995.

BAUER, B. O.; VELEN, T. T.; WINKLER, J. A. Old methodology sneakers: fashion and function in a cross-training era. *Annals of the Association of American Geographers*, 89, 4, 679-687, 1999.

BECK, M. B.; JAKEMAN, A. J.; MCALLEER, M. J. Construction and Evaluation of Models of Environmental Systems. In: *Modelling Change In Environmental Systems*. JAKEMAN, A. J.; BECK, M. B., et al (Eds). Chichester: John Wiley Sons, 3-35, 1993.

BENNETT, R. J.; CHORLEY, R. J. *Environmental Systems: Philosophy, Analysis and Control*. Londres: Methuen, 1978.

BERTOLINO, A. V. F. A., FERNANDES, N. F., MIRANDA, J. P., SOUZA, A. P., LOPES, M. S., PALMIERI, F. Effects of plough pan development on surface hydrology and on soil physical properties in Southeastern Brazilian plateau. *Jour. of Hydrology*, 393, 94-104, 2010.

BEVEN, K. Changing Ideas in Hydrology - The Case of Physically-Based Models. *Journal of Hydrology*, 105, 157-172, 1989.

_____. Future of Distributed Modelling. *Hydrological Processes*, 6, 279-298, 1992.

_____. Equifinality and Uncertainty in Geomorphological Modelling. In: *The Scientific Nature of Geomorphology*. RHOADS, B. L. e THORN, C. E. (Ed.). Chichester: John Wiley, 1996, 289-313, 1996.

_____. A manifesto for the equifinality thesis. *Journal of Hydrology*, 320, 1-2, 18-36, 2006.

_____. So how much of your error is epistemic? Lessons from Japan and Italy. *Hydrological Processes*, 27, 11, 1677-1680, 2013.

_____. Facets of uncertainty: epistemic uncertainty, non-stationarity, likelihood, hypothesis testing, and communication. *Hydrological Sciences Journal*, 61, 9, 1652-1665, 2016.

BEVEN, K.; BUYTAERT, W.; SMITH, L. A. On virtual observatories and modelled realities (or why discharge must be treated as a virtual variable). *Hydrological Processes*, 26, 12, 1906-1909, 2012.

BEVEN, K. J. *Rainfall-Runoff Modelling: The Primer*. Chichester: Wiley-Blackwell, 2012.

BIGARELLA, J. J.; MOUSINHO, M. R.; SILVA, J. X. Pediplanos, pedimentos e seus depósitos correlativos no Brasil. *Boletim Paranaense de Geografia*, 16-17, 117-151, 1965.

BLÖSCHL, G. Hydrologic Synthesis: Across Processes, Places and Scales. *Water Res. Res.*, 42, W03S02, 2006.

BLUE, B.; BRIERLEY, G. 'But what do you measure?' Prospects for a constructive critical physical geography. *Area*, 48, 2, 190-197, 2016.

BORGA, M., STOFFEL, M., MARCHI, L., MARRA, F. e JAKOB, M. Hydrogeomorphic response to extreme rainfall in headwater systems: Flash floods and debris flows. *Journal of Hydrology*, 518, 194-205, 2014.

BRACKEN, L. J.; WAINWRIGHT, J. Geomorphological equilibrium: myth and metaphor? *Transactions of the Institute of British Geographers*, 31, 2, 167-178, 2006.

BRASINGTON, J.; RICHARDS, K. Reduced-complexity, physically-based geomorphological modelling for catchment and river management. *Geomorphology*, 90, 3-4, 171-177, 2007.

BREDEHOEFT, J. Models and Model Analysis. *Ground Water*, 48, 3, 328-328, 2010.

BROOKS, S. M.; RICHARDS, K. S. Establishing the Role of Pedogenesis in Changing Soil Hydraulic Properties. *Earth Surface Processes and Landforms*, 18, 573-578, 1993.

BRUNET, R. *Sustainable Geography*. London: John Wiley, 2011.

BRUNSDEN, D.; LIN, J.-C. The concept of topographic equilibrium in neotectonic terrains. In: *Neotectonics and Resources*. COSGROVE, J. e JONES, M. (Ed.). London: Belhaven Press, 120-143, 1991.

BRUNSDEN, D.; THORNES, J. B. Landscape sensitivity and change. *Trans. Inst. Brit. Geogr.*, 4, 4, 1979.

BURTON, I. The quantitative revolution and theoretical geography. In: *The Conceptual Revolution in Geography*. DAVIES, W. K. D. (Ed.). Univ. London Press, 140-156, 1972.

CAERS, J. *Modeling Uncertainty in the Earth Sciences*. Chichester: Wiley-Blackwell, 2011.

CALVER, A.; CAMMERAAT, L. H. Testing a Physically-Based Runoff Model Against Field Observations on a Luxembourg Hillslope. *Catena*, v. 20, p. 273-288, 1993.

CAMPBELL, K.; OVEREEM, I.; BERLIN, M. Taking it to the streets: The case for modeling in the geosciences undergraduate curriculum. *Computers & Geosciences*, 53, 123-128, 2013.

CARRARA, A., CARDINALI, M., DETTI, R., GUZZETTI, F., PASQUI, V. e REICHENBACH, P. Gis Techniques and Statistical Models in Evaluating Landslide Hazard. *Earth Surface Processes and Landforms*, 16, 5, 427-445, 1991.

CHAVES, H. M. L. Adaptação do Modelo WEPP para as Condições Brasileiras. In: *Solos Altamente Susceptíveis à Erosão*. PEREIRA, V. P. e FERREIRA, M. E. (Ed.). Jaboticabal: UNESP/SBCS, 213-221, 1994.

CHORLEY, R. J. Climate and Morphometry. *Journal of Geology*, 65, 628-638, 1957.

CHORLEY, R. J. Geomorphology and general systems theory. *U. S. Geol. Survey Prof. Paper*, 500-B, 1962.

CHORLEY, R. J. Geography and Analogue Theory. *Annals of the Association of American Geographers*, 54, 2, 127-137, 1964.

CHORLEY, R. J.; HAGGETT, P. (Eds.) *Models In Geography*. Londres: Methuen, 816p., 1967.

CHORLEY, R. J.; KENNEDY, B. A. *Physical Geography: A Systems Approach*. London: Prentice-Hall International, 370p., 1971.

CHRISTOFOLETTI, A. *Análise de Sistemas em Geografia*. São Paulo: Hucitec, 1979.

_____. As Perspectivas dos Estudos Geográficos. In: *Perspectivas da Geografia*. CHRISTOFOLETTI, A. (Ed.). São Paulo: DIFEL, 11-36, 1982.

_____. Desenvolvimento da Quantificação em Geografia. *Geociências*, Vol. Esp., 67-78, 1990.

CHRISTOFOLLETTI, A. *Modelagem de Sistemas Ambientais*. São Paulo: Edgard Blucher, 236p., 1999.

CHURCH, M. Refocusing geomorphology: Field work in four acts. *Geomorphology*, 200, 184-192, 2013.

CHURCH, M.; MARK, D. M. On size and scale in geomorphology. *Progress in Physical Geography*, 4, 3, 342-390, 1980.

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

COELHO NETTO, A. L. Overland flow production in a tropical rainforest catchment : the role of litter cover. *Catena*, 14, 213-231, 1987.

COX, N. J. Assessing agreement of measurements and predictions in geomorphology. *Geomorphology*, 76, 3-4, 332-346, 2006.

COX, P. M. et al. Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model. *Nature*, 408, 9, 184-187, 2000.

CROSS, M.; MOSCARDINI, A. O. *Learning the Art of Mathematical Modelling*. Chichester: John Wiley & Sons, 1985.

CULLING, W. E. H. Multicyclic streams and the equilibrium theory of grade. *Journal of Geology*, 65, p. 259-274, 1957.

_____. Analytical theory of erosion. *J. Geol.*, 68, 336-344, 1960.

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

_____. Equifinality: modern approaches to dynamical systems and their potential for geographical thought. *Trans. Inst. Br. Geogr.*, 12, 57-72, 1987.

CYR, A. J.; GRANGER, D. E. Dynamic equilibrium among erosion, river incision, and coastal uplift in the northern and central Apennines, Italy. *Geology*, 36, 2, 103-106, 2008.

DAVIS, W. M. The Geographical Cycle. *Geographical Journal*, 14, 481-504, 1899.

DI BALDASSARRE, G.; BRANDIMARTE, L.; BEVEN, K. The seventh facet of uncertainty: wrong assumptions, unknowns and surprises in the dynamics of human–water systems. *Hydrological Sciences Journal*, 61, 9, 1748-1758, 2015.

DIETRICH, W. E., BELLUGI, D., SKLAR, L., STOCK, J., HEIMSATH, A. e ROERING, J.. Geomorphic transport laws for predicting landscape form and dynamics. In: *Prediction in Geomorphology*. WILCOCK PETER, R. e IVERSON RICHARD, M. (Ed.). Washington: American Geophysical Union, 103-132, 2003.

DIETRICH, W. E.; MONTGOMERY, D. R. *SHALSTAB: A Digital Terrain Model for Mapping Shallow Landslide Potential*. Nat. Council for Air and Stream Improvement, 26p., 1998.

DIETRICH, W. E., REISS, R., HSU, M.-L., AND MONTGOMERY, D.R. A Process- Based Model for Colluvium Soil Depth and Shallow Landsliding Using Digital Elevation Data. *Hydrological Processes*, 9, 383-400, 1995.

DOHERTY, J. Modeling: Picture Perfect or Abstract Art? *Ground Water*, 49, 4, 455, 2011.

DONNER, L. J.; LARGE, W. G. Climate Modeling. *Annual Review of Environment and Resources*, 33, 1, 1-17, 2008.

DUNNE, T. Stochastics Aspects of The Relations between Climate, Hydrology and Landform Evolution. *Transactions, Japanese Geomorphological Union*. 12, 1-24, 1991.

EGNER, H.; VON ELVERFELDT, K. A bridge over troubled waters? Systems theory and dialogue in geography. *Area*, 41, 3, 319-328, 2009.

ELSHORBAGY, A.; PARASURAMAN, K. On the relevance of using artificial neural networks for estimating soil moisture content. *Journal of Hydrology*, 362, 1-2, 1-18, 2008.

FATICHI, S. et al. An overview of current applications, challenges, and future trends in distributed process-based models in hydrology. *Journal of Hydrology*, 537, 45-60, 2016.

FENICIA, F.; MCDONNELL, J. J.; SAVENIJE, H. H. G. Learning from model improvement: On the contribution of complementary data to process understanding. *Water Resour. Res.*, 44, W06419, 2008.

FERNANDES, N. F. Modelagem Matemática em Geomorfologia: Potencialidades e Limitações. *Sociedade e Natureza*, 15, 222-227, 1996.

FERNANDES, N. F.; COELHO NETTO, A. L.; DEUS, C. E. Monitoramento dos fluxos d'água no solo : instrumentação alternativa. *Anais do II Simpósio de Geografia Física e Aplicada, Nova Friburgo, Rio de Janeiro*, 71-97, 1989.

FERNANDES, N. F.; COELHO NETTO, A. L.; LACERDA, W. A. Subsurface hydrology of layered colluvium mantles in unchannelled valleys - south-eastern Brazil. *Earth Surface Processes & Landforms*, 19, 7, 609-626, 1994.

FERNANDES, N. F.; DIETRICH, W. E. Modeling Hillslope Evolution Under Cyclic Climatic Oscillations: The Time Required to Steady-state. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 68, Supl. 1, Special Vol. of the Regional Conf. on Global Change, 157-162, 1996.

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

FERNANDES, N. F. et al. Topographic controls of landslides in Rio de Janeiro: Field evidence and modeling. *Catena*, 55, 2, 163-181, 2004.

FERNANDES, N. F., GUIMARÃES, R. F., GOMES, R. A. T., VIEIRA, B. C., MONTGOMERY, D. R., GREENBERG, H. M. Condicionantes Geomorfológicos dos Deslizamentos nas Encostas: Avaliação de Metodologias e Aplicação de Modelo de Previsão de Áreas Susceptíveis. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 2, 1, 51-71, 2001.

FISCHER, M. M. Expert Systems and Artificial Neural Networks for Spatial Analysis and Modelling. *Geographical Systems*, 1, 3, 221-235, 1994.

FORD, A. *Modeling the Environment: An Introduction to System Dynamics Models of Environmental Systems*. Washington, D.C.: Island Press, 2a, 401p., 2010.

FOSTER, G. R. Modeling the erosion process. In: *Hydrologic Modeling of Small Watersheds*, C. T. Haan, H. P. Johnson, and D. L. Brakensiek (Eds.), New York: ASAE, 297-380, 1982.

FRYIRS, K. A., BRIERLEY, G., PRESTON, N., SPENCER, J. Catchment-scale (dis)connectivity in sediment flux in the upper Hunter catchment, New South Wales, Australia. *Geomorphology*, 84, 3-4, 297-316, 2007.

FUKUNAGA, D. C., CECÍLIO, R., ZANETTI, S., OLIVEIRA, L. CAIADO, M. A. Application of the SWAT hydrologic model to a tropical watershed at Brazil. *Catena*, 125, 206-213, 2015.

FURLANI, S.; NINFO, A. Is the present the key to the future? *Earth-Science Reviews*, 142, 38-46, 2015.

GAUCH JR., H. G. Prediction, parsimony and noise. *American Scientist*, 81, 468-478, 1993.

GILBERT, G. K. *Report on the Geology of the Henry Mountains (Utah)*. U. S. Geographical and Geological Survey of the Rocky Mountains Region, Washington, D.C., 1877.

_____. The Convexity of Hilltops. *Journal of Geology*, v. XVII, n. 4, 344-350, 1909.

GILCHRIST, A. R. On Appraising Classical Models of Landscape Evolution for Passive Continental Margins. In: *Steepland Geomorphology*. SLAYMAKER, O. (Ed.), Chichester: John Wiley & Sons, 7-26, 1995.

GIORDANO, F. R., FOX, W., HORTON, W., WEIR, M. *A First Course in Mathematical Modeling*. Belmont: BROOKS/COLE, 4a, 620p., 2009.

GOMES, R. A. T. et al. Combining Spatial Models for Shallow Landslides and Debris-Flows Prediction. **Remote Sensing**, v. 5, p. 2219-2237, 2013. Disponível em: <>.

GOMES, R. A. T., GUIMARÃES, R.F., CARVALHO Jr., O., FERNANDES, N. F., VARGAS Jr., E. Identification of the Affected Areas by Mass Movement Through a Physically Based Model of Landslide Hazard Combined with an Empirical Model of Debris Flow. *Natural Hazards*, 45, 197-209, 2008.

GOMES, R. A. T., GUIMARÃES, R.F., CARVALHO Jr., O., FERNANDES, N. F. Análise de um Modelo de Previsão de Deslizamentos (SHALSTAB) em Diferentes Escalas Cartográficas. *Solos e Rochas*, 28, 1, 85-97, 2005.

GOVERS, G. Misapplications and Misconceptions of Erosion Models. In: *Handbook of Erosion Modelling*. MORGAN, R. P. C. e NEARING, M. (Ed.), New York:Wiley-Blackwell, 117-134, 2011.

GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S. Predicting Soil Loss and Runoff from Forest Roads and Seasonal Cropping Systems in Brazil Using WEPP. In: *Handbook of Erosion Modelling*. MORGAN, R. P. C. e NEARING, M. (Ed.). New York:Wiley-Blackwell, 186-194, 2011.

GUIMARÃES, R. F., CARVALHO Jr., O., GOMES, R. A. T., FERNANDES, N. F. Movimentos de Massa. In: *Geomorfologia: Conceitos e Tecnologias Atuais*. FLORENZANO, T. G. (Ed.).São Paulo: Oficina de Textos, 2008.

GUIMARÃES, R. F., MONTGOMERY, D. R., GREENBERG, H. M., FERNANDES, N. F., GOMES, R. A. T., CARVALHO Jr., O. A. Parameterization of soil properties for a model of topographic controls on shallow landsliding: Application to Rio de Janeiro. *Engineering Geology*, 69, 1-2, 98-108, 2003.

HACK, J. T. Interpretation of Erosional Topography in Humid Temperate Regions. *American Journal of Science*, 258A, 80-97, 1960.

_____. The equilibrium concept of landscape. *USGS Prof. Paper*, 484, 5-9, 1965.

HAGGETT, P.; CHORLEY, R. J. Models, Paradigmes and The New Geography. In: *Models In Geography*. CHORLEY, R. J. e HAGGETT, P. (Ed.), Londres: Methuen & Co., 1967.

HAGHIPOUR, N., BURG, J. P., IVY-OCHS, S., HAJDAS, I. KUBIK, P. CHRISTI, M. Correlation of fluvial terraces and temporal steady-state incision on the onshore Makran accretionary wedge in southeastern Iran: Insight from channel profiles and ¹⁰Be exposure dating of strath terraces. *Geological Society of America Bulletin*, 127, 3-4, 560-583, 2015.

HAINES-YOUNG, R. H.; PETCH, J. R. Multiple working hypotheses: equifinality and the study of landforms. *Trans. Inst. Br. Geog. N. S.*, 8, 458-466, 1983.

_____. *Physical Geography: Its Nature and Methods*. London: Harper & Row, 217p., 1986.

HAN, J.; GASPARINI, N. M.; JOHNSON, J. P. L. Measuring the imprint of orographic rainfall gradients on the morphology of steady-state numerical fluvial landscapes. *Earth Surface Processes and Landforms*, 40, 10, 1334-1350, 2015.

HARRISON, S. P.; BARTLEIN, P. J.; PRENTICE, I. C. What have we learnt from palaeoclimate simulations? *Journal of Quaternary Science*, 31, 4, 363-385, 2016.

HARTE, J. *Consider a Spherical Cow*. Mill Valley: University Science Books, 283p., 1988.

HARVEY, D. *Explanation in Geography*. Londres: Edward Arnold, 521p., 1969.

HILL, M. C. The Practical Use of Simplicity in Developing Ground Water Models. *Ground Water*, 44, 6, 775-781, 2006.

HOEY, T. B.; BISHOP, P. Testing Numerical Models in Geomorphology: How Can We Ensure Critical Use of Model Predictions? In: *Prediction in Geomorphology*. WILCOCK PETER, R. e IVERSON RICHARD, M. (Ed.). Washington:AGU, 241-256, 2003.

HOOSBEEK, M. R.; BRYANT, R. B. Towards the quantitative modeling of pedogenesis -- a review. *Geoderma*, 55, 3-4, 183-210, 1992.

HORTON, R. E. Drainage basin characteristics. *Trans. of the Am. Geophys. Union*, 13, 350-361, 1932.

_____. The role of infiltration in the hydrologic cycle. *Trans. of the Am. Geophys. Union*, 14, 446-460, 1933.

_____. Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. *Bulletin of the Geological Soc. of America*, 56, 2, 275-370, 1945.

HOWARD, A. D. Geomorphological systems - equilibrium and dynamics. *Am. J. Sci.*, 263, 302-312, 1965.

_____. A detachment-limited model of drainage basin evolution. *Water Resource Research*, 30, 7, 2261-2285, 1994.

HSU, L.; DIETRICH, W. E.; SKLAR, L. S. Experimental study of bedrock erosion by granular flows. *J. Geophys. Res.*, 113, n. F02001, 2008.

HUGGETT, R. J. *Modelling the Human Impact on Nature*. Oxford Univ. Press, 202p., 1993.

INKPEN, R. J. *Science, Philosophy and Physical Geography*. London:Routledge,164p., 2005.

IVERSON, R. M. How Should Mathematical Models of Geomorphic Processes be Judged? In: *Prediction in geomorphology*. WILCOCK PETER, R. e IVERSON RICHARD, M. (Ed.). Washington: AGU, 83-94, 2003.

JAKEMAN, A. J.; LETCHER, R. A.; NORTON, J. P. Ten iterative steps in development and evaluation of environmental models. *Env. Modelling & Software*, 21, 602-614, 2006.

JØRGENSEN, S. E. Overview of the model types available for development of ecological models. *Ecological Modelling*, 215, 1-3, 3-9, 2008.

KAMPF, S. K.; BURGESS, S. J. A framework for classifying and comparing distributed hillslope and catchment hydrologic models. *Water Resour. Res.*, 43, n. W05423, 2007.

KETTNER, A. J.; SYVITSKI, J. P. M. Modeling for environmental change. *Computers & Geosciences*, 53, 1-2, 2012.

KEYLOCK, C. J.; DORLING, D. What kind of quantitative methods for what kind of geography? *Area*, 36, 4, 358-366, 2004.

KIRCHNER, J. W. Getting the right answers for the right reasons: Linking measurements, analyses, and models to advance the science of hydrology. *Water Res. Res.*, 42, W03S04, 2006.

KIRCHNER, J. W., FINKEL, R., RIEBE, C., GRANGER, D., CLAYTON, J., KING, J., MEGAHAN, W. Mountain erosion over 10 yr, 10 k.y., and 10 m.y. time scales. *Geology*, 29, 591-594, 2001.

KIRCHNER, J. W., HOOPER, R., KENDALL, C., NEAL, C., LEAVESLEY, G. Testing and validating environmental models. *Science of The Total Environment*, 183, 1-2, 33-47, 1996.

KIRKBY, M. J. A Role for Theoretical Models in Geomorphology. In: *The Scientific Nature of Geomorphology*. RHOADS, B. L. e THORN, C. E. (Ed.). Chichester:Wiley, 257-272, 1996.

_____. Measurement and theory of soil creep. *Jour. Geology*, 75, 4, 359-378, 1967.

_____. Hillslope process-response models based on the continuity equation. *Trans. Inst. British Geographers, Spec. Publ.*, 3, 15-30, 1971.

_____. Models in Physical Geography. In: *Horizons in Physical Geography*. CLARK, M. J.; GREGORY, K. J., et al (Ed.), London: Macmillan, 47-61, 1987.

_____. A Consistent Framework for Modelling Geomorphic Processes and Landform Evolution. In: *Prediction in Geomorphology*. WILCOCK PETER, R. e IVERSON RICHARD, M. (Ed.). Washington: AGU, 95-102, 2003.

KIRKBY, M. J., NADEN, P. S., BURT, T. P., BUTCHER, D. P. *Computer Simulation in Physical Geography*. Chichester: John Wiley, 227p., 1987.

KLEMES, V. Of Carts and Horses in Hydrological Modelling. *Journal of Hydrologic Engineering*, 1, 43-49, 1997.

LANCASTER, S. T.; GRANT, G. E. You Want Me to Predict What? In: *Prediction in geomorphology*. WILCOCK PETER, R. e IVERSON RICHARD, M. (Ed.). Washington: AGU, 41-50, 2003.

LAWLER, D. M.; FAIRCHILD, I. J. New developments in process understanding and modelling in geomorphology: introduction and overview. *Earth Surface Processes and Landforms*, 35, 10, 1247-1250, 2010.

LEOPOLD, L. B. Downstream change of velocity in rivers. *American Journal of Science*, 251, 8, 606-624, 1953.

LEOPOLD, L. B.; MADDOCK, T. J. The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications. *U.S. Geol. Survey Prof. Paper*, 252, 57p., 1953.

LEOPOLD, L. B.; MILLER, J. P. Ephemeral Streams - Hydraulic Factors and Their Relation to the Drainage Net. *U. S. Geological Survey Prof. Paper*, 282A, 16-24, 1956.

LEOPOLD, L. B.; WOLMAN, M. G. River channel patterns: braided, meandering and straight. *U. S. Geol. Survey Prof. Paper*, 282B, 39-85, 1957.

MACMILLAN, B. (Ed.) *Remodelling Geography*. Oxford: Basil Blackwell, 348p., 1989.

MANDUCA, C. A., BAER, E., HANCOCK, G. MACDONALD, R., PATTERSON, S., SAVINA, M., WENNER, J. Making Undergraduate Geosciences Quantitative. *EOS*, 89, 16, 149-150, 2008.

MARCHIORO, E., FERNANDES, N. F., MACEDO, J. R., BHERING, S. B., GONÇALVES, A. O., ALVES, L. O., CAIADO, M. A. C. Modelagem da Produção de Sedimentos no Noroeste Fluminense como Subsídio ao Planejamento Ambiental: Um Estudo de Caso da Bacia do Córrego Santa Maria. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 12, 29-38, 2011.

MATTHEWS, K. B., RIVINGTON, M., BLACKSTOCK, K., McCRUM, G., BUCHAN, K., MILLER, D. Raising the bar? - The challenges of evaluating the outcomes of environmental modelling and software. *Environmental Modelling & Software*, 26, 3, 247-257, 2011.

MEERVELD, I. T.-V.; WEILER, M. Hillslope dynamics modeled with increasing complexity. *Journal Of Hydrology*, 361, 1-2, 24-40, 2008.

MENNIS, J.; GUO, D. Spatial data mining and geographic knowledge discovery--An introduction. *Computers, Environment and Urban Systems*, 33, 6, 403-408, 2009.

MERRITT, W. S.; LETCHER, R. A.; JAKEMAN, A. J. A review of erosion and sediment transport models. *Environmental Modelling & Software*, 18, 761-799, 2003.

MINASNY, B.; MCBRATNEY, A. B. A rudimentary mechanistic model for soil formation and landscape development: II. A two-dimensional model incorporating chemical weathering. *Geoderma*, 103, 1-2, 161-179, 2001.

MINASNY, B.; MCBRATNEY, A. B.; SALVADOR-BLANES, S. Quantitative models for pedogenesis -- A review. *Geoderma*, 144, 1-2, 140-157, 2008.

MINSHULL, R. *An Introduction to Models in Geography*. London: Longman, 162p., 1975.

MOEYERSONS, J.; DE PLOEY, J. Quantitative data on splash erosion, simulated on unvegetated slopes. *Zeitschrift fur Geomorphologie, Supplementband*, 25, 120- 131, 1976.

MONTGOMERY, D. R., AND DIETRICH, W.E. A physically-based model for the topographic control on shallow landsliding. *Water Res. Research*, 30, 1153-1171, 1994.

MOORHEAD, D. L., SINSABAUGH, R., LINKINS, A., REYNOLDS, J. Decomposition processes: modelling approaches and applications. *Science of The Total Environment*, 183, 1-2, 137-149, 1996.

MOREIRA, I. C.; MELLO, C. L.; FERNANDES, N. F. Aplicação de Modelos Matemáticos de Evolução do Relevo (GOLEM) na Simulação do Recuo da Borda de Falha da Bacia de Resende". *Anais do 44o Congresso Brasileiro de Geologia*, Curitiba (PR), Sociedade Brasileira de Geologia, 2008.

_____. Modeling Long-Term Landscape Evolution in Southeastern Brazil: The Retreatment of the Mantiqueira Escarpment. *2009 EGU - European Geosciences Union General Assembly*, Viena, Áustria, 12315p., 2009.

_____. 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*, UGB, Rio de Janeiro, 1-5, 2012.

MORGAN, R. P. C.; NEARING, M. *Handbook of Erosion Modelling*. Wiley-Blackwell, 416p., 2011.

MUCHER, H. J.; DE PLOEY, J. Experimental and micromorphological investigation of erosion and redeposition of loess by water. *Earth Surface Processes*, 2, 117-124, 1977.

MULLIGAN, M.; WAINWRIGHT, J. Modelling and Model Building. In: *Environmental Modelling: Finding Simplicity in Complexity*. 2nd WAINWRIGHT, J. e MULLIGAN, M. (Ed.). Chichester: Wiley-Blackwell, 2a., 7-26, 2013.

MURRAY, A. B. Reducing model complexity for explanation and prediction. *Geomorphology*, 90, 3-4, 178-191, 2007.

NASH, D. Forms of bluffs degraded for different lengths of time in Emmet County, Michigan, U.S.A. *Earth Surf. Proc.*, 5, 331-345, 1980.

NASH, D. B.; BEAUJON, J. S. Modeling degradation of terrace scarps in Grand Teton National Park, USA. *Geomorphology*, 75, 3-4, 400-407, 2006.

NDIAYE, B. et al. Effects of agricultural practices on hydraulic properties and water movement in soils in Brittany (France). *Soil and Tillage Research*, 93, 2, 251-263, 2007.

NEARING, M. A. et al. A process-based soil erosion model for USDA - Water Erosion Prediction Project Technology. *Transactions ASAE*, 32, 1587-1593, 1989.

NEARING, M. A. et al. Measurements and Models of Soil Loss Rates. *Science*, 290, 5495, 1300-1301, 2000.

NELSON, B. L. *Stochastic Modeling: Analysis & Simulation*. New York: Dover, 1995.

NEVES, R. G. M.; NEVES, M. C.; TEODORO, V. D. Modelling: Interactive computational modelling to improve teaching of physics in the geosciences. *Computers & Geosciences*, 56, 119-126, 2013.

NICHOLAS, A. P.; QUINE, T. A. Crossing the divide: Representation of channels and processes in reduced-complexity river models at reach and landscape scales. *Geomorphology*, 90, 3-4, 318-339, 2007.

_____. Quantitative assessment of landform equifinality and palaeoenvironmental reconstruction using geomorphic models. *Geomorphology*, 121, 3-4, 167-183, 2010.

NIEMANN, J. D. et al. A quantitative evaluation of Playfair's law and its use in testing long-term stream erosion models. *Earth Surf. Proc. and Landforms*, 26, 12, 1317-1332, 2001.

ORESQUES, N.; SHRADER-FRECHETTE, K.; BLITZ, K. Verification, validation, and confirmation of numerical models in the earth sciences. *Science*, 263, 641-645, 1994.

OWEN, J. J. et al. The sensitivity of hillslope bedrock erosion to precipitation. *Earth Surface Processes and Landforms*, 36, 1, 117-135, 2011.

PACHEPSKY, Y. A.; RAWLS, W. J.; LIN, H. S. Hydropedology and pedotransfer functions. *Geoderma*, 131, 3-4, 308-316, 2006.

PAOLA, C. Is it possible to predict the past? *Lithosphere*, 5, 4, 450-451, 2013.

PARKER, G. et al. A new framework for modeling the migration of meandering rivers. *Earth Surface Processes and Landforms*, 36, 1, 70-86, 2011.

PELLETIER, J. D. *Quantitative Modeling of Earth Surface Processes*. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 295p., 2008.

PELLETIER, J. D.; RASMUSSEN, C. Geomorphically based predictive mapping of soil thickness in upland watersheds. *Water Resour. Res.*, 45, 2009.

PEREIRA, A., SHOCK, C., FEIBERT, E., FLOCK, R., LIMA, L., FERNANDES, N. F. Monitoramento da Irrigação Por Meio da Tensão de Água do Solo: Guia Prático. Ponta Grossa, PR: Editora da UEPG, 20p., 2006.

PERRON, J. T., RICHARDSON, P. W., FERRIER, K. L., LAPOTRE, M. The root of branching river networks. *Nature*, 492, 7427, 100-103, 2012.

PETERSON, A. E.; SWAN, J. B. (Eds.) *Universal Soil Loss Equation: Past, Present, and Future*. Soil Sci. Soc. Am. Special Publication. Califórnia, 53p., 1979.

PHILLIPS, J. D. The end of equilibrium? *Geomorphology*, 5, 195-201, 1992.

_____. Nonlinear dynamical systems in geomorphology: revolution or evolution? *Geomorphology*, 5, 219-229, 1992.

_____. Emergence and pseudo-equilibrium in geomorphology. *Geomorphology*, 132, 3-4, 319-326, 2011.

PHILLIPS, J. D.; RENWICK, W. H., Eds. *Geomorphic Systems*. 23rd Binghamton Symposium in Geomorphology. Amsterdam: Elsevier, 1992.

PIÑEIRO, G., PERELMAN, S., GUERSCHMAN, J., PARUELO, J. How to evaluate models: Observed vs. predicted or predicted vs. observed? *Ecological Modelling*, 216, 316-322, 2008.

RANATUNGA, K.; NATION, E. R.; BARRATT, D. G. Review of soil water models and their applications in Australia. *Environmental Modelling & Software*, 23, 9, 1182-1206, 2008.

REFSGAARD, J. C. et al. Climate change impacts on groundwater hydrology – where are the main uncertainties and can they be reduced? *Hydrological Sciences Journal*, 1-13, 2016.

REFSGAARD, J. C., VAN DER SLUIJS, J., HOJBERJ, A. VANROLLEGHEM, P. Uncertainty in the environmental modelling process - A framework and guidance. *Environmental Modelling & Software*, 22, 11, 1543-1556, 2007.

REID, S. C., LANE, S., MONTGOMERY, D., BROOKES, C. Does hydrological connectivity improve modelling of coarse sediment delivery in upland environments? *Geomorphology*, 90, 3-4, 263-282, 2007.

REMPE, D. M.; DIETRICH, W. E. A bottom-up control on fresh-bedrock topography under landscapes. *PNAS - Proc. Nat. Acad. Sciences*, 111, 18, 6576-6581, 2014.

RENARD, P.; ALCOLEA, A.; GINSBOURGER, D. Stochastic versus Deterministic Approaches. In: *Environmental Modelling: Finding Simplicity in Complexity*. WAINWRIGHT, J. e MULLIGAN, M. (Ed.). Chichester: Wiley-Blackwell, 2a, 33-149, 2013.

RENEAU, S. L.; DIETRICH, W. E. Erosion Rates In The Southern Oregon Coast Range - Evidence For An Equilibrium Between Hillslope Erosion And Sediment Yield. *Earth Surface Processes and Landforms*, 16, 4, 307-322, 1991.

RODRIGUES, C. A Teoria Geossistêmica e sua Contribuição aos Estudos Geográficos e Ambientais. *Revista do Departamento de Geografia da USP*, 14, 69-77, 2001.

ROVIRA, P.; ROVIRA, R. Fitting litter decomposition datasets to mathematical curves: Towards a generalised exponential approach. *Geoderma*, 155, 3-4, 329-343, 2010.

SALMUN, H.; MOLOD, A. Progress in modeling the impact of land cover change on the global climate. *Progress in Physical Geography*, 30, 6, 737-749, 2006.

SCANLON, T. M., CAYLOR, K. LEVIN, S., RODRIGUEZ-ITURBE, I. Positive feedbacks promote power-law clustering of Kalahari vegetation. *Nature*, 449, 13, 2007.

SCHEINGROSS, J. S.; LAMB, M. P. Sediment transport through self-adjusting, bedrock-walled waterfall plunge pools. *Jour. of Geophys. Res.: Earth Surface*, 121, 5, 939-963, 2016.

SCHERTZ, D. L. *Use and Abuse of the Universal Soil Loss Equation*. USDA-SCS, Agronomy Technical Note, 36, 1-2. 1978

SCHUMM, S. A.; KHAN, H. R. Experimental study of channel patterns. *Bull. Geol. Soc. Am.*, 83, 1755-1790, 1972.

SHOCK, C. C. Soil water potential measurement by granular matrix sensors. In: *Encyclopedia of Water Sciences*. STEWART, B. A. e HOWELL, T. A. (Ed.), Marcel Dekker, 899-903, 2003.

SIDLE, R. C. Field Observations and Process Understanding in Hydrology: Essential Components in Scaling. *Hydrological Processes*, 20, 1439-1445, 2006.

SILBERSTEIN, R. P. Hydrological models are so good, do we still need data? *Environmental Modelling & Software*, 21, 9, 1340-1352, 2006.

SKLAR, L. S.; DIETRICH, W. E. A mechanistic model for river incision into bedrock by saltating bed load. *Water Resources Research*, 40, 6, 2004.

SMITH, J.; SMITH, P. *Environmental Modelling: An Introduction*. Oxford: Oxford Univ. Press, 2007.

SOHL, T.; SAYLER, K. Using the FORE-SCE model to project land-cover change in the southeastern United States. *Ecological Modelling*, 219, 1-2, 49-65, 2008.

SOULSBY, C. et al. Catchment data for process conceptualization: simply not enough? *Hydrological Processes*, 22, 12, 2057-2061, 2008.

SOUZA, L., CARBONO, A., MARTHA, L. F., MELLO, C. L., FERNANDES, N.F. Simulação Numérica da Influência da Litologia no Recuo Diferencial da Escarpa da Serra da

Mantiqueira em Resende e Itatiaia (RJ). *Anais do 9º SINAGEO - Simpósio Nacional de Geomorfologia*, Rio de Janeiro, UGB, 1-5, 2012.

STOLAR, D. B.; WILLET, S. D.; MONTGOMERY, D. R. Characterization of topographic steady state in Taiwan. *Earth & Planetary Science Letters*, 261, 421-431, 2007.

STRAHLER, A. N. Equilibrium Theory of Erosional Slopes Approached by Frequency Distribution Analysis - Part I. *Am. Jour. Sci.*, 248, 673-696, 1950a.

_____. Equilibrium Theory of Erosional Slopes Approached by Frequency Distribution Analysis - Part II. *Am. Jour. Sci.*, 248, 800-814, 1950b.

_____. Dynamic Basis of Geomorphology. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 63, 923-938, 1952a.

_____. Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 63, 1117-1142, 1952b.

STRAHLER, A. N. Statistical analysis in geomorphic research. *Journal of Geology*, 62, 1-25, 1954.

_____. Quantitative Slope Analysis. *Bull. Geol. Soc. Am.*, 67, 571-596, 1956.

_____. Quantitative Analysis of Watershed Geomorphology. *American Geophysical Union, Transactions*, 38, 6, 913-920, 1957.

STRANGEWAYS, I. *Measuring the Natural Environment*. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 365p, 2000.

SUNDE, M., HE, H., HUBBART, J., SCROGGINS, C. Forecasting streamflow response to increased imperviousness in an urbanizing Midwestern watershed using a coupled modeling approach. *Applied Geography*, 72, 14-25, 2016.

THOMAZ, E. L. Experimentação, Monitoramento e Tratamento de Dados como Fundamento à Modelagem em Geografia Física. *Anais do XV Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada*. Vitória, ES, 1, 1-7, 2013.

THOMAZ, E. L.; PEREIRA, A. A. Performance assessment of a microsprinkler. *Acta Scientiarum*, 36, 2, 315-321, 2014.

TONINI, R., ARMIGLIATO, A., PAGNONI, G., TINTI, S. Modeling the 2004 Sumatra tsunami at Seychelles Islands: site-effect analysis and comparison with observations. *Natural Hazards*, 70, 2, 1507-1525, 2014.

TUCKER, G. E.; HANCOCK, G. R. Modelling landscape evolution. *Earth Surface Processes and Landforms*, 35, 1, 28-50, 2010.

VAN DER BEEK, P. Modelling Landscape Evolution. In: *Environmental Modelling: Finding Simplicity in Complexity*. WAINWRIGHT, J. e MULLIGAN, M. (Ed.), 2a, Chichester: Wiley-Blackwell, 309-331, 2013.

VAN STEIJN, H. The development of a laboratory set-up to measure creep induced by freeze-thaw cycles. *Earth Surface Processes*, 2, 247-250, 1977.

VAN WESTEN, C. J.; CASTELLANOS, E.; KURIAKOSE, S. L. Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: An overview. *Engineering Geology*, 102, 3-4, 112-131, 2008.

VANWALLEGHEM, T., STOCKMANN, U., MINASNY, B. McBRATNEY, A. A quantitative model for integrating landscape evolution and soil formation. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 118, 2, 331-347, 2013.

VIEIRA, B. C.; FERNANDES, N. F.; AUGUSTO FILHO, O. Shallow landslide prediction in the Serra do Mar, São Paulo, Brazil. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 10, 9, 1829-1837, 2010.

VIEIRA, B. C.; MARTINS, T. D. Modelos em Geografia Física: Conceitos e Aplicações na Previsão de Escorregamentos. *Geosp - Espaço e Tempo (online)*, 20, 1, 194-206, 2016.

VILES, H. A.; GOUDIE, A. S. Interannual, decadal and multidecadal scale climatic variability and geomorphology. *Earth-Science Reviews*, 61, 1-2, 105-131, 2003.

WAINWRIGHT, J.; MULLIGAN, M. (Eds.). *Environmental Modelling: Finding Simplicity in Complexity*. Chichester:Wiley-Blackwell, 475p., 2nd ed., 2013.

WEILER, M.; MCDONNELL, J. J. Conceptualizing lateral preferential flow and flow networks and simulating the effects on gauged and ungauged hillslopes. *Water Resour. Res.*, 43, 3, W03403, 2007.

WENNER, J. et al. The Case For Infusing Quantitative Literacy Into Introductory Geosciences Courses. *Numeracy*, 2, 1, 1-25, 2009.

WHIPPLE, K. X. Fluvial Landscape Response Time: How Plausible Is Steady-State Denudation? *American Journal of Science*, 301, 4-5, 313-325, 2001.

WILCOCK, P. R.; IVERSON, R. M. Prediction in Geomorphology. In: *Prediction in Geomorphology*. WILCOCK, P. R. e IVERSON, R. M. (Ed.). Washington: AGU, 3-11, 2003.

WILKS, D. S.; WILBY, R. L. The weather generation game: a review of stochastic weather models. *Progress In Physical Geography*, 23, 3, 329-357, 1999.

WILLGOOSE, G. Mathematical Modeling of Whole Landscape Evolution. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 33, 1, 443-459, 2005.

WILLGOOSE, G. R.; HANCOCK, G. R.; KUCZERA, G. A Framework for the Quantitative Testing of Landform Evolution Models. In: *Prediction in geomorphology*. WILCOCK PETER, R. e IVERSON RICHARD, M. (Ed.). Washington: AGU, 195-216, 2003.

WISCHMEIER, W. H. Use and Misuse of the Universal Soil Loss Equation. *Journal of Soil and Water Conservation*, 31, 1, 5-9, 1976.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. *Predicting rainfall erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains; guide for selection of practices for soil water conservation*. USDA. Agricultural Handbook, Washington, D.C., 282, 1965

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D.; UHLAND, R. E. Evaluation of Factors in the Soil-Loss Equation. *Agricultural Engineering*, 39, 458-462, 1958.

WOLDENBERG, M. (Ed.). *Models in Geomorphology*. Boston: Allen & Unwin, 434p., 1985.

WOLMAN, M. G. The More Things Change. *Annals of the Association of American Geographers*, 94, 4, 723-728, 2004.

WOLMAN, M. G.; GERSON, R. Relative scales of time and effectiveness of climate in watershed geomorphology. *Earth Surface Processes*, 3, 2, 189-208, 1978.

WOLMAN, M. G.; MILLER, J. P. Magnitude and frequency of forces in geomorphic processes. *The Journal of Geology*, 68, 1, 54-74, 1960.

XAVIER DA SILVA, J., GOES, M.H.B., FERREIRA, A.L., BERGAMO, R.B.A.A., IERVOLINO, P., ROCHA, E.N., PACHECO, E.A., SILVEIRA, R.S., MACHADO, R.D., COSTA, W.P. Estimativa de Riscos de Deslizamentos/Desmoronamentos no Maciço do Tinguá e Arredores. Anais do XXXIX Congr. Bras. de Geologia, Salvador, 273-276, 1996.

YEAGER, C. D.; STEIGER, T. Applied geography in a digital age: The case for mixed methods. *Applied Geography*, 39, 1-4, 2013.

ZHENG, C., POETER, E., HILL, M. DOHERTY, J. Understanding through Modeling. *Ground Water*, 44, 6, 769-770, 2006.

Recebido em: 15/6/2016

Aceito em: 30/6/2016