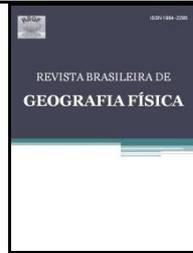




ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: www.ufpe.br/rbgfe



Estimativa da profundidade do solo: parte 2 – métodos matemáticos

Gean Paulo Michel - Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) .

Autor correspondente. E-mail: gean.michel@ufrgs.br

Masato Kobiyama - Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

Artigo recebido em 13/11/2015 e aceite em 28/12/2015.

RESUMO

O presente trabalho é o segundo de uma série de dois artigos que têm como objetivo apresentar o estado da arte referente aos métodos de estimativa da profundidade do solo. Neste segundo artigo foram abordados os métodos matemáticos, subdivididos em: (i) estatísticos; (ii) empíricos; e (iii) baseados em processos. Os métodos estatísticos são representados principalmente por técnicas da estatística clássica e ferramentas de geoestatística implementadas em ambiente de SIG. Tal método vem alcançando bons resultados na definição da distribuição espacial da profundidade do solo. Entretanto, necessitam de um grande número de dados para estabelecimento dos modelos e, além disso, precisam ser reformulados para diferentes áreas de estudo. Os modelos empíricos são os que apresentam a abordagem mais simples. Aqueles que trazem relações embasadas na dinâmica de formação dos solos têm gerado bons resultados. Tais métodos são mais comumente usados quando há escassez de dados ou quando os mecanismos de formação dos solos ainda não puderam ser plenamente descritos, parametrizados e/ou quantificados. Os métodos baseados em processos são aqueles que utilizam equações de base física para descrever os inúmeros mecanismos que influenciam na formação e desenvolvimento dos solos. Embora gerem resultados muito satisfatórios, requerem que os processos físicos atuantes na área analisada estejam bem definidos e que os parâmetros e dados de entrada sejam precisos. Enfim, conclui-se que a escolha do melhor método para estimativa da distribuição espacial da profundidade do solo dependerá do tipo, quantidade e qualidade dos dados existentes para a área de estudo.

Palavras-chave: Profundidade do solo, métodos matemáticos, métodos estatísticos, métodos empíricos, métodos baseados em processos

Soil depth estimation: part 2 – mathematical methods

Abstract

The present work is the second of two papers that aim to present the state of the art related to methods used to estimate soil depth. This second paper addressed the mathematical methods and subdivided them into three classes: (i) statistical; (ii) empirical; and (iii) process-based. The statistical methods are represented mainly by classic statistical methods and geostatistical tools implemented in GIS. These methods have well achieved the determination of the soil depth spatial distribution. However, they require many data to define the models and need to be reformulated when applied to other study areas. The empirical methods are the simplest among three mathematical ones. The empirical models that include relations based on the soil formation dynamics have demonstrated good performances. They are commonly used when there is a lack of data or where the soil formation mechanisms are not yet described, parametrized and/or quantified. The process-based methods are those that use physically-based equations to describe various mechanisms affecting the soil formation and evolution. Though generating satisfactory results, they require that the physical processes acting in the study area are well defined and that parameters and input data are accurate. Finally, it is concluded that an adoption of the best soil depth estimation method depends on the type, quantity and quality of existing soil-data of the study area.

Keywords: Soil depth, mathematical methods, statistical methods, empirical methods, process-based methods

Introdução

Na primeira parte deste trabalho (Michel e Kobiyama, submetido), os métodos de campo para estimativa da profundidade do solo foram discutidos. Os métodos de campo são capazes de gerar informações pontuais ou relativas a pequenas áreas. Entretanto, muitas vezes é necessário que existam informações acerca da profundidade do solo sobre uma área maior, por exemplo, bacias hidrográficas. Neste sentido, os métodos matemáticos se tornam de grande relevância, já que possuem capacidade de realizar a estimativa da profundidade do solo a partir de outras variáveis.

Os métodos matemáticos utilizados para tal finalidade são aqueles que se baseiam em equações ou relações, de base estatística, empírica ou física, que levam em consideração atributos físicos do local analisado. Neste sentido, um método matemático de avaliação da profundidade do solo está embasado na resposta de uma ou de um sistema de equações ou relações aplicadas às condições locais. Desta maneira, podem ser geradas informações espacialmente distribuídas da profundidade do solo que são indispensáveis em diversos processos de modelagem ambiental (hidrológica, de estabilidade de encostas, de fluxos de detritos, de evolução da paisagem, entre outros). Conforme há uma melhoria significativa na capacidade dos modelos ambientais em representar detalhes de pequena escala em suas formulações, a distribuição espacial dos parâmetros, tal como a profundidade do solo, torna-se ainda mais relevante no processo de modelagem (Grayson e Bloschl, 2000).

Moore et al. (1993) expuseram a necessidade de mapas e levantamentos de solos com resoluções mais adequadas às suas aplicações (em escalas próximas de 1:5000). Além disso, apontaram as dificuldades em se elaborar mapas nesta escala utilizando as metodologias tradicionais de campo. Várias abordagens têm sido propostas para estimativa da profundidade do solo, principalmente aquelas baseadas em parâmetros oriundos de relações geomorfológicas, de uso e cobertura do solo, e hidrológicas (Tesfa, 2009). Portanto, em relação aos métodos matemáticos, o presente trabalho adota uma subdivisão entre metodologias baseadas em: (i) modelos estatísticos; (ii) modelos empíricos; e (iii) modelos baseados em processos (fisicamente embasados).

Modelos estatísticos

Os modelos estatísticos de estimativa da profundidade do solo são baseados no pressuposto de que uma combinação de fatores que definiu a ocorrência de certa profundidade do solo em determinado local também determinará a profundidade nos demais locais. Na análise estatística, pressupõe-se que, por exemplo, as características do terreno (morfologia), que controlam os padrões de escoamento da água, podem ter relação com os atributos do solo (Moore et al., 1993). Desta maneira, nos locais onde as mesmas características do terreno se manifestam, há uma tendência de que os atributos do solo sejam similares. Segundo McBratney et al. (2003), os métodos que ajustam estas relações quantitativas entre as propriedades do solo e o ambiente são baseados, principalmente, em modelos lineares generalizados, árvores de classificações e regressão, redes neurais artificiais, lógica *fuzzy*, redes bayesianas e geoestatística.

Geralmente os modelos estatísticos para estimativa da distribuição espacial dos atributos do solo adotam o seguinte formato (Gessler et al., 1995):

$$S_i = f_i(\text{declividade e, posição na bacia, radiação solar...})$$

Em que S é um atributo individual do solo (e.g. profundidade do solo, pH e resistência); f é uma função de um ou vários atributos ambientais; e i é o domínio fisiográfico caracterizado por condições ambientais comuns.

Zhu e Lin (2010) elaboraram uma classificação ainda mais detalhada destes métodos onde os classificaram em: (i) estatísticos (e.g., regressão linear múltipla e árvores de regressão); (ii) geoestatísticos (e.g., krigagem ordinária e krigagem universal); e (iii) híbridos (e.g., co-krigagem e krigagem-regressão). Os modelos estatísticos podem considerar diversas características ambientais em suas formulações, sendo que é mais comum que considerem, ao menos, as características relacionadas ao relevo (topografia/geomorfologia). Alguns modelos consideram apenas estas características (McBratney et al., 2003). Além disso, os atributos do solo estimados através deste método quase sempre vão além da profundidade do solo, sendo que suas propriedades hidráulicas são também muitas vezes objetos de investigação.

A utilização de atributos geomorfológicos quantificados na tentativa de estimar características do solo teve seu início no final da década de 1980 (McKenzie e Austin, 1993; Moore et al., 1993). Anteriormente, devido à ausência ou

dificuldade de aplicação de técnicas sofisticadas de determinação dos parâmetros geomorfológicos, as análises eram basicamente qualitativas (Furley, 1976; Stone et al., 1985; Kreznor et al., 1989). As metodologias que levam em consideração a posição na paisagem do ponto a ser estudado estão cada vez mais sendo fortalecidas pela melhoria das técnicas de quantificação dos parâmetros geomorfológicos (McBratney et al., 2003). Entretanto, métodos comuns de interpolação de parâmetros, tais como a krigagem, geralmente ignoram qualquer tipo de mecanismo de pedogênese (Moore et al. 1993), o que dificulta a obtenção de resultados coerentes com as condições locais.

McBratney et al. (2003) apresentaram uma revisão de métodos de elaboração de mapas digitais de solos baseados em características ambientais obtidas através de sistemas de informações geográficas (SIG). Considerando esta revisão elaborada, propuseram um quadro genérico que engloba todos os métodos estatísticos pesquisados, chamado scorpan-SSPFe (*soil spatial prediction function with spatially autocorrelated errors*). O prefixo “scorpan” refere-se aos sete tipos de variáveis ambientais utilizadas por este método:

s : Solo, propriedades do solo, além da procurada, em determinado ponto;

c : Clima, propriedades climáticas do ambiente naquele ponto;

o : Organismos, vegetação, fauna ou atividade humana;

r : Relevo, topografia, atributos da paisagem (geomorfológicos);

p : Material de origem, litologia;

a : Idades, o fator tempo;

n : Espaço, posição espacial.

Os modelos que se baseiam em um ou mais dos fatores listados acima podem ser chamados de modelos scorpan e são descritos da seguinte maneira:

$$S_a = f(s, c, o, r, p, a, n)$$

Em que S_a representa o atributo procurado do solo. Cada fator é representado por um conjunto de uma ou mais variáveis contínuas ou categorizadas, por exemplo, ao utilizar a temperatura e a chuva média anual para representar o clima. Para aplicação deste método, é necessário que existam medições realizadas em determinados pontos do atributo que se pretende distribuir espacialmente. Nestes mesmos pontos, também são determinadas as variáveis ambientais. A relação entre os dados medidos e as variáveis ambientais proporciona a definição e calibração do modelo, tal como um problema genérico de regressão. As regras ou equações de regressão ajustadas através dos dados de calibração são então aplicadas aos demais pontos da área de estudo, onde apenas são conhecidos os valores das variáveis ambientais.

Considerando os modelos scorpan, a Tabela 1 traz uma recapitulação dos trabalhos que utilizaram tal método para determinar a distribuição espacial da profundidade do solo ou de seus horizontes. Além disso, é indicado o modelo estatístico no qual cada análise foi baseada. Na Tabela 1, a maior parte dos trabalhos publicados antes de 2003 foram extraídos de McBratney et al. (2003).

Tabela 1 – Sumário de modelos scorpan em ordem cronológica.

Autores	Atributo	Método	Fator Preditivo							
			<i>s</i>	<i>c</i>	<i>o</i>	<i>r</i>	<i>p</i>	<i>a</i>	<i>n</i>	
Walker et al. (1968)*	Espessura de horizontes	RLM							X	
Pennock et al. (1987)*	Espessura de horizontes	AD, RLM							X	
Moore et al. (1993)*	Espessura de horizontes	RLM							X	
Odeh et al. (1994, 1995)*	Profundidade do solo	RLM, KO, CK, KR						X		X
Zhu e Band (1994), Zhu (1997), Zhu et al. (1996, 1997, 2001)*	Profundidade de horizontes	SF, CE				X	X	X		
Gessler et al. (1995)*	Profundidade de horizontes	MLG						X		
Knotters et al. (1995)*	Profundidade de horizontes	KO, CK, KR	X							X
McKenzie e Ryan (1999)*	Profundidade do solo	MLG, AR		X			X	X	X	

Sinowski e Auerswald (1999)*	Profundidade do solo	AD	X	X
Bourennane et al. (2000)*	Espessura de horizontes	KDE	X	X
Continuação				
Gessler et al. (2000)	Profundidade de horizontes e do solo	RLM	X	
McIntosh et al. (2000)*	Profundidade de horizontes	ANOVA	X	
Ryan et al. (2000)*	Profundidade do solo	AR, MLG	X X X X	
Zhu (2000)*	Profundidade de horizontes	RNA	X X X	
Park et al. (2001)*	Espessura e profundidade de horizontes	RLM	X	
Tsai et al. (2001)	Profundidade do solo	RLM	X	X
Florinsky et al. (2002)*	Espessura do solo e profundidade de horizontes	RLM	X	
McKenzie et al. (2003)	Profundidade de horizontes e do solo	SF	X	
Hengl et al. (2004)*	Espessura do solo superficial	MLG, KR	X	
Schmidt et al. (2005)	Profundidade da camada de raízes e do solo	SF	X	
Murphy et al. (2005)	Profundidade de horizontes e do solo	SF	X	X
Ziadat (2005)	Profundidade do solo	RLM	X	
Penížek e Boruvka (2006)	Profundidade do solo	RLM, KO, CK, KR	X	
Sumfleth e Duttman (2008)	Profundidade de horizontes	RLM, DIP, KO, KR	X X	X
Kuriakose et al. (2009)	Profundidade do solo	RLM, KO, KR	X X	X
Dahlke et al. (2009)	Profundidade do solo	ME	X	X
Tesfa et al. (2009)	Profundidade do solo	MAG, FA	X X	
Zhu et al. (2010)	Espessura de horizontes, profundidade até o manto	SF, RLM	X	
Chaplot et al. (2010)	Espessura de horizontes	KO	X	X
Ziadat (2010)	Profundidade do solo	RLM	X	
Zhu e Lin (2010)	Profundidade do solo	KO, KR	X	X

AD = análise discriminante, ANOVA = análise de variância, AR = árvores de regressão, CE = conhecimento especializado, CK = co-krigagem, DIP = distância inversa ponderada, FA = florestas aleatórias, KDE = krigagem com deriva externa, KO = krigagem ordinária, KR = krigagem-regressão, MAG = modelos aditivos generalizados, ME = médias estatísticas, MLG = modelos lineares generalizados, RLM = regressão linear múltipla, RNA = redes neurais artificiais, SF = sistemas *fuzzy*,

*Trabalhos listados por McBratney et al. 2003.

Uma detalhada explanação dos métodos estatísticos mencionados acima encontra-se em Hastie et al. (2009). A seguir se fará uma breve referência aos métodos estatísticos. Grande parte dos trabalhos utiliza o método de regressão linear múltipla (RLM). Neste método, é assumido que a variável de interesse (um atributo do solo, neste caso) varia aproximadamente de forma linear com

cada uma das variáveis preditoras (Hastie et al. 2009). A definição dos parâmetros de variação é realizada geralmente através da técnica de mínimos quadrados. Segundo McBratney et al. (2003), o método tem sido vastamente usado por causa de sua facilidade de aplicação e vasta disponibilidade (diversos *softwares* desenvolvem os cálculos). A análise discriminante (AD),

desenvolvida por Fisher (1936), também descreve uma relação linear. Segundo Pennock et al. (1987), a metodologia envolve o ajuste de um eixo a uma distribuição multivariada que maximize a distância entre a média dos grupos. Sucessivos eixos são ajustados até que uma quantidade insignificante de variância permaneça por ser explicada.

Moore et al. (1993) tentaram relacionar a espessura do horizonte A com as características ambientais de sua área de estudo. As características ambientais utilizadas eram todas vinculadas a topografia da região e foram calculadas a partir de um grid com células de aproximadamente 15 m. Análises de RLM foram conduzidas na tentativa de relacionar as variáveis. Os autores encontraram influência significativa da declividade e do índice de umidade para a maioria dos atributos do solo estudados.

Gessler et al. (1995), em um estudo similar, demonstraram correlação entre o índice topográfico e a profundidade do solo, julgando que este comportamento era previsto, já que o índice topográfico combina informações de contexto com informações locais (área de contribuição a montante e declividade, respectivamente). Entretanto, ressaltaram que algumas variáveis sem relação explicitamente definida também podem ser significativas. Por exemplo, no mesmo estudo foi constatado que a curvatura plana, que não reúne informações contextuais, também foi um fator preditivo para a profundidade do solo e para a espessura do horizonte A.

Os modelos lineares generalizados (MLG) estendem os modelos de regressão linear para acomodar distribuições não normais de dados, onde se faz uma tentativa de reformulação do modelo ao invés de transformação dos dados (Lane, 2002). Os modelos aditivos generalizados (MAG) são uma extensão não paramétrica dos MLG (Yee e Mitchell, 1991). Nos MAGs os valores ajustados resultantes não vêm de um modelo estabelecido, sendo que a estrutura dos dados é examinada primeiramente. Os dados determinam o formato da curva resposta, ao invés de estarem limitados pelos formatos disponíveis nas classes paramétricas.

Nos modelos de árvores, como a *Árvore de Regressão (AR)*, ao invés de ajustar um modelo aos dados, uma estrutura de árvore é gerada dividindo os dados recursivamente em um determinado número de grupos, com cada nível de divisão sendo estabelecido de maneira a maximizar a diferença na variável resposta entre grupos resultantes (McBratney et al., 2003). Estes

modelos lidam bem com a não linearidade dos dados e funcionam com dados categóricos e contínuos, sendo de mais fácil interpretação que os modelos citados anteriormente. As *Florestas Aleatórias (FA)* são a combinação de ARs, de maneira que cada árvore depende dos valores de um vetor aleatório amostrado independentemente e com a distribuição igual para todas as árvores da floresta (Breiman, 2001). Tesfa et al. (2009), utilizando MAG e FA, concluíram que ambas as metodologias foram capazes de prever aproximadamente metade das profundidades dos solos da bacia, sendo que a metodologia da FA apresentou um erro médio quadrático ligeiramente menor.

McKenzie e Ryan (1999) propuseram uma metodologia para prever a distribuição espacial das propriedades do solo através de atributos topográficos extraídos de modelos digitais de terreno e sensoriamento remoto radiométrico gama. Os autores utilizaram o índice de umidade topográfico e o índice de Prescott (índice que relaciona chuva com evaporação), além de diversas relações topográficas para inferir, através da metodologia da AR, sobre a distribuição espacial da profundidade do solo e fósforo e carbono totais presentes no solo. Em relação ao parâmetro de profundidade do solo, o modelo conseguiu reduzir em 42% a variância entre os resultados calculados e observados quando comparados com um modelo nulo (ou seja, a média dos valores observados). Os autores ainda frisaram a necessidade de medir as variáveis ambientais e do solo na mesma escala em que os processos que as relacionam ocorrem, sendo que, quanto mais adequada à resolução utilizada, maior a capacidade de predição da distribuição espacial dos parâmetros do solo.

As *Redes Neurais Artificiais (RNA)* tentam construir um modelo matemático que supostamente funciona de maneira análoga ao cérebro humano (McBratney et al., 2003). As RNAs são constituídas por um sistema de “neurônios” interconectados, sendo que, segundo Chang e Islam (2000), três características definem o sistema: (i) o modelo assumido para um neurônio isolado; (ii) como os neurônios estão conectados para formar uma rede; e (iii) como as intensidades das interconexões são determinadas. Na descrição do sistema, não há pressupostos em relação à estrutura do modelo. Em vez disso, as redes são ajustadas ou treinadas para que entradas de dados levem a saídas alvo específicas (Gershenfeld, 1999). Usando as RNAs, Zhu (2000) demonstrou como a metodologia pode ser útil na determinação da profundidade do solo

quando comparada a metodologias baseadas apenas no conhecimento de especialistas.

Os modelos baseados em Sistemas *Fuzzy* (SF) tentam representar a incerteza existente entre os atributos preditores e preditos (McBratney et al., 2003). Ao contrário dos métodos mais convencionais, que admitem apenas funções binárias (o elemento é membro do grupo, ou não), os SFs admitem a possibilidade de pertencimento parcial ao grupo. Por isso, são adequados para situações onde as fronteiras entre classes não podem ser nitidamente definidas (Burrough, 1989). Nos mapas elaborados com base em lógica *fuzzy*, os solos são representados por vetores de valores de adesão, que descrevem o grau de similaridade do solo local com um valor padrão predefinido, ou uma classe preestabelecida (Zhu, 1997). Scull et al. (2003) pontuaram que os modelos *fuzzy* são estrategicamente importantes nas pesquisas de solo por serem capazes de representar a continuidade e a complexidade dos solos, expressando características por graus de similaridade com determinados padrões, e não existência ou não de similaridade absoluta como na lógica Booleana. Os sistemas baseados na lógica *fuzzy* frequentemente utilizam-se do Conhecimento Especializado (CE), seja aquele adquirido através de especialistas ou de observações de campo e que conseguem estabelecer as relações entre o ambiente e a manifestação de determinadas características do solo, para definição do grau de adesão entre o atributo preditor e o predito (Zhu et al., 2001).

Zhu (1997), Zhu et al. (2001) e Zhu e Mackay (2001), propuseram um modelo baseado na lógica *Fuzzy* e no conhecimento especializado acoplado a um SIG. O modelo foi chamado de *Soil-Land Interface Model – SoLIM*. O modelo consiste basicamente na representação de similaridades ao longo da paisagem, permitindo que o solo seja considerado como um meio contínuo, transcendendo a ideia de unidades espaciais com parâmetros uniformes. As condições ambientais de determinada área são extraídas de *softwares* SIG, enquanto que as relações entre as características do solo e as condições ambientais são elaboradas a partir da opinião de especialistas ou de observações de campo. As condições ambientais das demais áreas servem de base para determinação dos padrões de manifestação de suas características do solo, baseada nas relações estabelecidas anteriormente. O contraponto em utilizar este tipo de metodologia é a necessidade de informações ambientais (principalmente topográficas) de boa qualidade, além de conhecimento específico sobre

as relações entre o solo e as condições ambientais especificamente na área de estudo.

Os métodos geoestatísticos, tais como Krigagem ordinária (KO), Co-Krigagem (CK), Krigagem-regressão (KR), Krigagem com Desvios (KDE) e Distância Inversa Ponderada (DIP), estão sendo cada vez mais utilizados na tentativa de obter dados espacialmente distribuídos com acurácia, coletando o menor número possível de amostras, através de técnicas de interpolação (Zhu e Lin, 2010). Segundo Oliver e Webster (1990), a KO é essencialmente um método de estimativa por médias locais ponderadas, onde os pesos são determinados pelos variogramas e pela configuração dos dados. Pode ser considerado um interpolador otimizador, já que as estimativas são não tendenciosas e tem variância mínima conhecida. Kravchenko e Bullock (1999) reportaram que propriedades do solo que demonstram uma variabilidade aleatória ao longo do terreno menor que 10% podem ser mais bem mapeadas com o método KO.

Estudos preliminares demonstraram que o uso de variáveis auxiliares, que vão além da distribuição espacial dos pontos amostrados, é importante na estimativa das propriedades do solo (Ahmed e De Marsily, 1987). Alguns métodos de interpolação, tais como CK, KDE e KR, utilizam variáveis auxiliares para aumentar a acurácia da interpolação e reduzir o número mínimo necessário de observações para atingir o valor esperado para as variáveis (Zhu e Lin, 2010). Em geral, a utilização de métodos de interpolação complementados por variáveis auxiliares geram melhores resultados que os métodos geoestatísticos genéricos, como a KO.

A CK é a extensão lógica da KO para situações onde duas ou mais variáveis são espacialmente interdependentes e para situações onde os valores que serão estimados não foram tão intensivamente amostrados quanto às outras variáveis as quais estarão relacionados (Oliver e Webster, 1990). Na CK variáveis aleatórias são simultaneamente determinadas utilizando suas inter-relações e co-dependência espacial (Odeh et al., 1995). Quando o processo de krigagem utiliza variáveis auxiliares (ou “externas”) para modelar a deriva (ou tendência) dos dados, em vez de usar apenas uma função das coordenadas dos dados observados, é chamado de Krigagem com Deriva Externa (KDE) (Hengl et al., 2004). A KR geralmente é baseada em uma técnica similar àquela utilizada na KED, sendo que, na KR, primeiramente é aplicado um processo comum de regressão entre o parâmetro desejado e as demais observações, seguido de uma krigagem ordinária

dos valores preditos (Odeh et al., 1994). Hengl et al. (2004) afirmaram que, na realidade, os métodos de KR e KDE são equivalentes e devem, quando aplicados com os mesmos pressupostos, gerar os mesmos resultados.

O método de interpolação da distância inversa ponderada (DIP) traz como pressuposto que o valor de um atributo em determinado local, onde não foram feitas observações, equivale à média ponderada dos pontos onde existem dados conhecidos dentro de uma vizinhança circundante ao local não amostrado (Robinson e Metternicht, 2006). Desta maneira, pontos com dados próximos ao local de interesse têm pesos relativamente maiores quando comparados com os que estão a uma distância maior. Tal qual a KO, o método DIP traz a desvantagem de não considerar fatores relativos à formação e evolução dos solos, e, portanto, demonstra potencial limitado para mapeamento das particularidades dos solos (Sumfleth e Duttman, 2008), inclusive a profundidade.

Baseado nas informações e conclusões levantadas por estes trabalhos percebe-se claramente que os atributos topográficos são os principais parâmetros preditores da profundidade do solo, qualquer que seja a metodologia aplicada (Tabela 1). A aptidão inerente aos atributos topográficos em descrever as características do solo já foi apontada por Scull et al. (2003). O segundo grupo de atributos mais utilizado são aqueles relacionados a fatores que descrevem a atividade de organismos (fauna, flora e ser humano). A maior parte das metodologias utilizadas nos trabalhos citados teve, em maior ou menor grau, um desempenho satisfatório na tentativa de determinar a profundidade do solo ao longo da bacia. As técnicas geoestatísticas, impulsionadas pelo aprimoramento das ferramentas de SIG, estão sendo otimizadas através de sua combinação com outras técnicas advindas da estatística clássica. Além disso, esta incorporação possibilita a consideração de mais variáveis na estimativa dos parâmetros desejados, promovendo previsões cada vez mais acuradas. Entretanto, a eficácia dos métodos e a escolha do modelo ideal dependem de diversos fatores tais como escala, parâmetro a ser mensurado e características locais da área de estudo. Scull et al. (2003) apontaram que áreas montanhosas florestadas, com alta declividade, foram pouco estudadas, por isso ainda é necessário que as metodologias sejam testadas em ambientes mais diversos.

Modelos empíricos

Os modelos empíricos de estimativa da profundidade do solo podem ser considerados, os mais simplistas, visto que muitas vezes baseiam-se apenas na relação observada entre um determinado parâmetro e uma variável desejada. O número de trabalhos publicados que adotam tal método é muito menor, quando comparado aos demais. Embora seja uma abordagem simples, muitas vezes a modelagem empírica pode gerar resultados mais adequados do que aqueles obtidos com modelos mais sofisticados. Isto se dá considerando que o conhecimento acerca dos processos atuantes no perfil do solo, sua formulação matemática e sua posterior aplicação através de metodologias sofisticadas ainda não estão plenamente desenvolvidos (Catani et al., 2010), e assim, muitas vezes não alcançam os resultados esperados.

Saulnier et al. (1997) propuseram duas equações empíricas para determinação da profundidade do solo em toda a extensão de uma bacia hidrográfica. Neste trabalho, a variação espacial da profundidade do solo foi incorporada ao TOPMODEL, proposto por Beven e Kirkby (1979), demonstrando como a variabilidade da transmissividade do solo pode afetar a resposta hidrológica de uma bacia. As equações não foram desenvolvidas com o propósito de mapear, de maneira acurada, a profundidade do solo. Mas sim, com o propósito de simular dois tipos diferentes de distribuição espacial da profundidade do solo na bacia e avaliar o efeito da consideração destes diferentes padrões. A primeira equação proposta por Saulnier et al. (1997) traz os valores de profundidade do solo como uma função linear decrescente da elevação:

$$z_i = z_{\max} - \left(\frac{z_{\max} - z_{\min}}{e_{\max} - e_{\min}} \right) \cdot (e_i - e_{\min}) \quad (1)$$

Em que z_i é a profundidade do solo em determinado ponto; e_i é a elevação no mesmo ponto; z_{\max} e z_{\min} são o máximo e mínimo valores para a profundidade, respectivamente; e e_{\max} e e_{\min} são o máximo e mínimo valores de elevação na bacia hidrográfica, respectivamente.

No caso onde o comportamento do valor médio da profundidade da bacia é conhecido, é possível rearranjar a amplitude dos valores de profundidade ($z_{\max} - z_{\min}$) para que os valores calculados sejam consistentes com a média. Quando a Eq. (1) é aplicada a uma bacia hidrográfica, obtém-se uma profundidade rasa para as áreas de cabeceira, enquanto que para as áreas mais baixas, o solo se torna profundo. A

lógica por trás do conceito é que o sedimento das áreas mais altas é conduzido gravitacionalmente para as áreas mais baixas, o que reduz as profundidades nas cabeceiras e as aumenta nas áreas baixas.

A segunda equação proposta por Saulnier et al. (1997) estabelece um decréscimo linear da profundidade do solo em função da declividade do local analisado:

$$z_i = z_{\max} - \left(\frac{z_{\max} - z_{\min}}{\tan \theta_{\max} - \tan \theta_{\min}} \right) \cdot (\tan \theta_i - \tan \theta_{\min}) \quad (2)$$

Em que θ_{\max} e θ_{\min} são a declividade máxima e mínima da bacia, respectivamente; e θ_i é a declividade da encosta em determinado ponto. Com a Eq. (2) também pode-se estabelecer uma amplitude para a profundidade do solo de maneira que se mantenha a consistência da profundidade média da bacia. A Eq. (2) tenta descrever a profundidade do solo em termos de propensão a ocorrência de erosão. Pontos de declividade mais acentuada tendem a demonstrar maiores potenciais erosivos, conseqüentemente criando profundidades menores do solo, enquanto que, zonas de baixa declividade são propícias à deposição, apresentando profundidades maiores.

Silva (2010) desenvolveu um modelo hidrológico com considerações a respeito da distribuição espacial da profundidade do solo e utilizou a média aritmética das profundidades calculadas com as Eqs. (1) e (2) em sua abordagem. Embora Saulnier et al. (1997) e Silva (2010) tenham estabelecido a distribuição espacial da profundidade do solo em suas bacias, nenhum dos autores tinha a intenção de verificar o desempenho de seus modelos comparando-os à realidade. A real intenção destes autores era apenas a adoção de determinado padrão de distribuição espacial da profundidade do solo e a verificação do efeito desta adoção no processo de modelagem hidrológica. Por isso, as equações propostas por estes autores não foram comparadas com dados de campo para calibração e validação.

Partindo para uma abordagem extraída de princípios físicos, Catani et al. (2010) propuseram uma equação empírica para estimativa da profundidade do solo mais robusta que as Eqs. (1) e (2) ou sua média. A equação proposta tem como base conservação da massa para uma coluna de solo situada na encosta. Considerando a perda de massa por transporte de sedimento devido ao rastejamento do solo e ao fluxo superficial obtém-se:

$$\nabla \rho_s q_s \propto -K(\nabla^2 e) \quad (3)$$

Em que ρ_s é a massa específica do solo; q_s é o fluxo de sedimento; e K é um coeficiente de difusão ou advecção. A Eq. (3) implica que a perda do solo está relacionada ao laplaciano da elevação, ou seja, a curvatura da encosta.

Para contabilizar o efeito do posicionamento do ponto pela extensão da bacia, e também para considerar o comprimento da encosta e área de contribuição, Catani et al. (2010) propuseram uma metodologia de posicionamento. Nesta metodologia, a bacia é dividida em unidades de comportamento similar, delineadas através de informações geológicas, geomorfológicas, topográficas e dados de campo. A partir da localização, elaborou-se um índice (η) de espessura relativa do solo baseado na toposequência da encosta pertencente à determinada unidade.

Visto que a ocorrência de movimentos de massa pode perturbar a relação entre o relevo e as perdas de solo, Catani et al. (2010) propuseram também o estabelecimento de uma declividade limite para a ocorrência de movimentos de massa e regulação da profundidade do solo. Este valor de declividade foi estabelecido com base em valores de ângulo de atrito interno do solo e em registros históricos de escorregamentos. Assim, a expressão final se dá pela seguinte equação:

$$z = -K_C \cdot C \cdot \eta \cdot \psi^{-1} \quad (4)$$

Em que K_C é um parâmetro de calibração; C é um índice baseado na curvatura da encosta; e ψ é um limiar de contribuição dos escorregamentos. Foi proposto que ψ é igual a $(1 - \tan \theta_{lim})$ nos pixels com a declividade maior que a declividade limite (θ_{lim}) e 1 para o restante dos locais. Os parâmetros C , ψ e η expressam, na forma de números que variam de 0 a 1, a propensão de determinada localidade acumular solo, enquanto o K_C , o qual é calculado para cada litologia a partir de medições de campo, auxilia na calibração da fórmula e transforma o número em um valor métrico. Este modelo foi nomeado por Catani et al. (2010) de *GIST – Geomorphologically Indexed Soil Thickness*.

Catani et al. (2010) utilizaram 217 medições diretas da profundidade do solo para realizar a calibração e a validação do modelo, sendo que 55 valores foram utilizados na calibração e os 162 restantes na validação. Além disso, os resultados da aplicação do GIST foram

comparados com resultados obtidos pela aplicação de sua versão simplificada (o sGIST, onde a geomorfologia não é utilizada para definição das unidades de comportamento similar) e das Eqs. (1) e (2). Os resultados mostraram que a aplicação das Eqs (1) e (2) gerou erros substanciais, tanto em termos de erro máximo quanto em termos de erro médio absoluto. Através da comparação dos seus dados medidos em campo com valores calculados, Catani et al. (2010) demonstraram que a Eq. (1) gera uma tendência de subestimação da profundidade do solo próximo aos divisores das bacias, e uma superestimação nos vales ou pés das encostas. A Eq. (2) apresentou resultados ainda piores, sendo que a profundidade do solo foi superestimada em todos os pontos de controle. Esta tendência encontrada leva a crer que a inserção de um coeficiente de minimização na Eq. (2) pode vir a alavancar o desempenho da mesma.

O sGIST apresentou um resultado levemente melhor que as Eqs. (1) e (2). Entretanto, ao levar em consideração os efeitos da geomorfologia, com o GIST, os resultados melhoraram significativamente, apresentando erro médio absoluto de 11 cm. Estes resultados implicam que o GIST apresenta-se como uma ferramenta satisfatória para a estimativa da profundidade do solo na bacia, principalmente tratando-se de estudos de estabilidade de encostas ou hidrológicos. Além disso, a diferença entre os resultados obtidos entre o GIST e sGIST indica a importância da consideração das características geomorfológicas na estimativa da profundidade do solo.

Schulz et al. (2008) elaboraram um modelo empírico para estimativa da espessura do colúvio nas encostas costeiras de Seattle, nos EUA. Neste modelo, a espessura do colúvio foi descrita como proporcional à posição do ponto na encosta e também à sua declividade. Trechos da encosta foram classificados em quatro diferentes morfologias: (i) escarpas; (ii) bancadas; (iii) trechos a jusante de bancadas; e (iv) encostas planares. Segundo o pressuposto adotado, a espessura do colúvio se reduz na direção de montante das escarpas, já que estas são o limite superior da produção de colúvio, de maneira proporcional a sua posição e a declividade da mesma. Além disso, é considerado que a partir da escarpa, a espessura do colúvio tende a aumentar, devido à adição de material desprendido de áreas a montante. Porém, considerou-se que a partir de determinado ponto há uma redução na espessura devido à remoção de colúvio próximo ao pé das encostas, devido a processos erosivos. A jusante de bancadas foi considerada que o colúvio

apresenta formato de cunha, com sua espessura sendo reduzida na direção de montante. Devido às características dos depósitos gerados por processos gravitacionais da região onde o modelo foi desenvolvido, foi considerado que o colúvio é mais espesso nos locais de menor declividade, qualquer que seja a morfologia.

Parâmetros topográficos (declividade do ponto, altura e declividade da escarpa, distância até a base e o topo da escarpa, entre outros) foram extraídos do modelo digital de elevação. Estas variáveis foram relacionadas com 40 medições realizadas para calibração do modelo. A equação final que descreve a espessura do colúvio (T_c) proposta por Schulz et al. (2008) é:

$$T_c = 21 \cdot f(\theta) \cdot [1,1 \cdot f(\theta_e, H_e) + 0,1 \cdot f(D_e)] \cdot A_e - z_t \quad (5)$$

onde $f(\theta)$ é uma função da declividade da encosta; $f(\theta_e, H_e)$ é uma função da declividade θ_e e altura da escarpa H_e ; $f(D_e)$ é uma função da distância a jusante a partir da escarpa, D_e ; A_e é um fator de ajuste para a morfologia da escarpa; e z_t é a profundidade máxima do colúvio no pé das encostas. A Eq. (5) é válida para escarpas, bancadas e encostas planares. Para trechos a jusante de bancadas a equação se simplifica para:

$$T_c = f(\theta) \cdot f(e) - z_t \quad (6)$$

Em que $f(e)$ é uma função da elevação do ponto.

O modelo desenvolvido por Schulz et al. (2008) pode ser considerado empírico, pois as funções inseridas nas Eqs. (5) e (6) utilizam-se de relações e limiares empíricos para sua definição. Por exemplo, os autores impuseram um limite de declividade de 46,5° para existência de algum colúvio na encosta. Para declividades acima deste valor limite, a profundidade foi considerada nula. Uma peculiaridade no modelo é que, diferentemente do modelo proposto pela Eq. (2), a relação entre profundidade do solo e declividade não é linear, o que notavelmente melhorou o desempenho do mesmo na determinação da profundidade.

O modelo completo proposto por Schulz et al. (2008) conseguiu explicar boa parte da ocorrência dos solos colúviais das encostas da área de estudo, sendo que para colúvios menos espessos que 1,7 m houve uma ligeira superestimativa, enquanto que para mais espessos houve uma ligeira subestimativa. Os autores ainda frisaram que alguns pressupostos relativos ao comportamento da espessura do colúvio frente à distância da escarpa foram incorretos, ao menos

em parte. Isto foi verificado durante o processo de calibração do modelo. Godt et al. (2008) aplicaram a mesma metodologia proposta por Schulz et al. (2008), baseando-se na declividade do ponto e na declividade, altura e distância da escarpa, considerando uma relação não linear da declividade com a profundidade do solo.

Salciarini et al. (2006) demonstraram que os dados medidos de profundidade de sua bacia ajustaram-se bem a uma curva exponencial da declividade, ou seja:

$$z = 14 \cdot \exp(-0,0693\theta) \quad (7)$$

As profundidades foram medidas até uma declividade de aproximadamente 30°, excluindo da análise as declividades maiores, que possuem maior potencial de geração de tendências não lineares.

Uma comparação entre cinco diferentes modelos empíricos para distribuição espacial da profundidade do solo foi conduzida por Segoni et al. (2012). Nesta comparação foram incluídos os modelos descritos pelas Eqs. (1) e (2); os modelos GIST e sGIST; e um último modelo, chamado de Sexp. O modelo Sexp consiste, basicamente, na Eq. (2), porém com uma relação exponencial entre a profundidade do solo e a declividade da encosta, que faz com que ocorra um decaimento mais rápido da espessura do solo com o aumento da declividade. Através do cálculo do erro médio absoluto, os autores demonstraram que o modelo GIST foi melhor para as duas bacias analisadas. Em seguida, o melhor desempenho foi apresentado pelo modelo Sexp. Entretanto, ao analisar a distribuição dos erros, os autores destacaram que o modelo Sexp tende a subestimar os valores de profundidade do solo. Considerando a possibilidade de execução de um ajuste mais apurado do modelo Sexp e a facilidade em se obter o parâmetro para sua aplicação, o Sexp metodologia pode ser promissora em áreas de estudo com poucos dados.

Segundo Godt et al. (2008), a escolha do modelo adequado para estimativa da profundidade do solo deve ser guiada pelas características regionais e pelos dados disponíveis. Para paisagens dissecadas em ambientes temperados, onde as taxas de produção de solo podem ser estimadas, modelos de difusão do solo podem gerar estimativas acuradas da profundidade do solo. Entretanto, em locais onde os processos não-difusivos imperam, tais como ambientes declivosos, onde os movimentos de massa abruptos dominam o transporte e deposição

coluvial, relações empíricas locais entre espessura do solo e topografia podem ser mais apropriadas.

Modelos baseados em processos

Os modelos de estimativa da profundidade do solo baseados em processos são aqueles que tentam representar o resultado da interação entre os diferentes processos atuantes na encosta, descrevendo cada um deles através de equações matemáticas. Em geral, estes modelos apresentam uma base física, tal como a formulação do balanço de massa em um volume de controle presente na encosta. Godt et al. (2008) chamam a atenção para a aplicação deste tipo de modelagem, que pode gerar resultados muito acurados quando utilizado dentro de determinadas condições.

Dietrich et al. (1995) foram pioneiros na tentativa de determinar a profundidade do solo coluvial a partir de modelos baseados em processos, embora trabalhos anteriores já tivessem esboçado uma teoria similar (Culling, 1960; Kirkby, 1971). Segundo Dietrich et al. (1995), quando a topografia é bem descrita pelos dados digitais de elevação, o modelo é capaz de estimar a espessura dos depósitos coluviais em vales não canalizados e identificar os locais de exposição do manto rochoso. A equação que descreve o balanço de massa para a profundidade do solo é descrita como:

$$\rho_s \frac{\partial z}{\partial t} = -\rho_r \frac{\partial e_b}{\partial t} - \rho_s \nabla \cdot \vec{q}_s \quad (8)$$

onde ρ_s e ρ_r são a massa específica do solo e da rocha, respectivamente; e_b é a elevação da interface entre solo e rocha; e \vec{q}_s é o vetor de transporte de solo. O primeiro termo da Eq. (8) representa a mudança na espessura do solo com o tempo (t), o segundo termo é a taxa de transformação de rocha em solo devido ao rebaixamento da interface solo-rocha, e o último termo é o divergente do transporte de solo. A teoria envolvida na Eq. (8) é a base de diversos trabalhos que foram elaborados na tentativa de descrever a morfologia das encostas, tais como Culling (1960), Culling (1963), Kirkby (1971) e Hirano (1975). A Eq. (8) também é vastamente aplicada na modelagem da evolução da paisagem – MEP. Porém, na MEP, em vez de analisar a evolução da profundidade do solo, observam-se as variações na topografia do terreno (Tucker e Hancock, 2010). Para solucionar a Eq. (8) em função da profundidade do solo, é necessário estabelecer uma lei de produção de solo e outra de

transporte de solo. A Figura (1) mostra um esquema ilustrativo do funcionamento da Eq. (8).

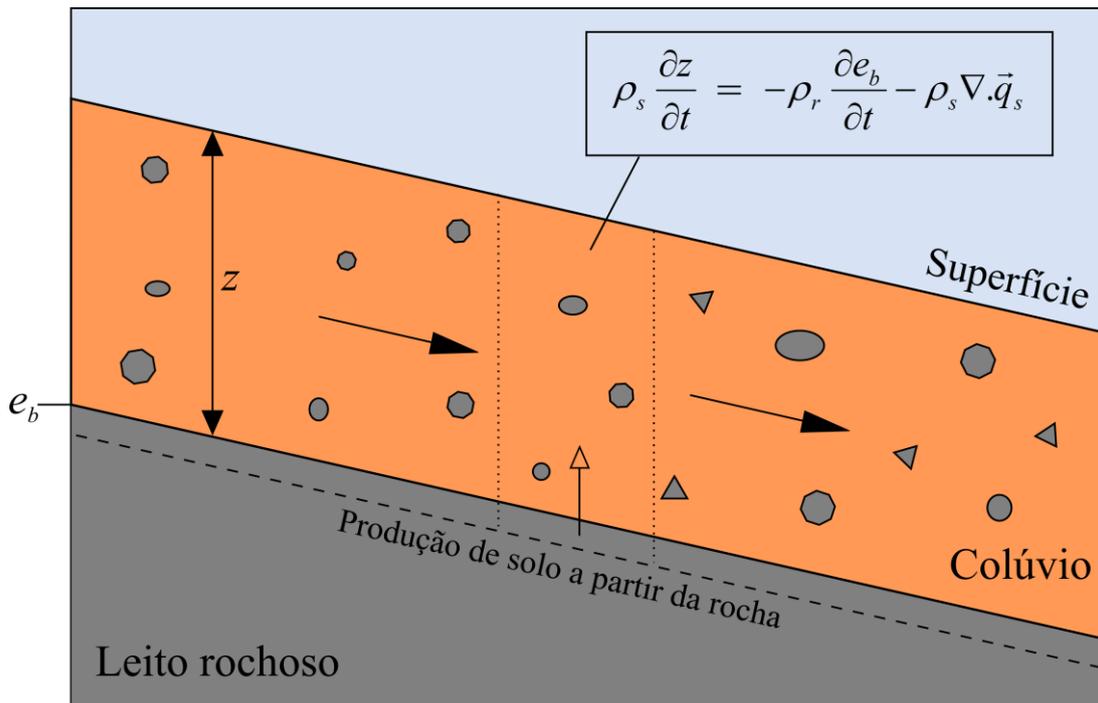


Figura 1 – Balanço de massa entre o transporte e a produção de solo que controla a profundidade do solo coluvial. (Adaptado de Dietrich et al. (1995) e Heimsath et al. (1997)).

Leis de produção de solo a partir da rocha matriz

Heimsath et al. (1997) e Heimsath et al. (2001) estabeleceram com dados de campo uma lei de produção do solo a partir da rocha matriz. Estes autores utilizaram medições da profundidade do solo para demonstrar que a curvatura (um indicativo da produção de solo) decai com o aumento da espessura do solo, e finalmente determinaram o formato da função de produção do solo. O estudo foi complementado por medições *in situ* de taxas de produção de solo determinadas a partir de núclídeos cosmogênicos (^{10}Be e ^{26}Al) que corroboraram com a relação exponencial inversa definida. Então, a função de produção de solo é descrita por:

$$-\frac{\partial e_b}{\partial t} = \varepsilon(Z) \cdot \sec\theta = \varepsilon_0 \cdot \exp(-\alpha_1 \cdot Z) \quad (9)$$

Em que Z é espessura do solo normal a encosta; $\varepsilon(Z)$ é a taxa de produção do solo na direção normal a inclinação da encosta; ε_0 é a taxa de produção do solo em profundidade zero; e α_1 é um parâmetro de ajuste.

Saco et al. (2006) tentaram estabelecer as implicações de se considerar a umidade do solo nas funções de produção de solo e descrever qual

tipo de dinâmica de produção de solo é necessária para que a topografia da rocha matriz tenha um padrão espacial diferente daquela encontrada na superfície. Assim, estes autores propuseram uma função de produção de solo na forma:

$$-\frac{\partial e_b}{\partial t} = \varepsilon_0 \cdot (1 + \beta_1 \cdot F(x_1, x_2))^{\gamma_1} \cdot \exp(-\alpha_1 \cdot Z) \quad (10)$$

Em que $F(x_1, x_2)$ é uma função variável de dependência espacial, ou seja, dependente das coordenadas planimétricas x_1 e x_2 ; β_1 e γ_1 são parâmetros de ajuste. Se esta função for igual a zero, a Eq. (10) torna-se igual a Eq. (9). Em contraponto, pode-se adotar uma variação espacial da função de maneira que áreas que apresentarem valores maiores para esta função denotem taxas de produção de solo mais acentuadas. Por exemplo, F aumentando em função da umidade do solo (devido ao estímulo ao intemperismo químico e atividade biológica) e ocasionando um aumento na taxa de produção de solo a partir da rocha matriz. Esta modificação permitiu que se estabelecesse um modelo arqueado (*humped*) de dependência entre a taxa de produção e profundidade do solo. Assim, a teoria vastamente discutida na geomorfologia, onde a maior taxa de

produção de solo se dá a uma profundidade diferente da nula, pode ser contemplada sem disparidade entre o modelo proposto e dados observados em campo.

Leis de transporte de solo

As leis de transporte de solo ao longo das encostas foram denominadas, por Dietrich et al. (2003), leis de transporte geomorfológico (LTG). Estas leis descrevem diversos processos de transporte atuantes na encosta ao longo de escalas de tempo geomorfológicas. Para alguns processos, as leis propostas já foram parametrizadas e testadas, enquanto que, para outros, as leis são ainda inexistentes, não parametrizadas e/ou não testadas. A principal lei de transporte em encostas refere-se ao rastejamento (*creeping*) do solo, ocasionado por contração e dilatação devido a ciclos seco/úmido, quente/frio, congelamento/descongelamento e atividade biológica. Os modelos que se baseiam nestas leis são denominados modelos difusivos de transporte de solo. A equação mais comumente utilizada para descrever este processo é dada por:

$$\bar{q}_s = -K \cdot \nabla e \quad (11)$$

Em que K é uma constante de proporcionalidade com unidades de um coeficiente de difusão [L^2/T]. Esta relação linear entre o fluxo de sedimentos e a curvatura da encosta foi sustentada por McKean et al. (1993) e Small et al. (1999), com experimentos de campo utilizando núclídeos cosmogênicos (^{10}Be). Embora esta hipótese tenha sido validada, ela foi testada apenas para encostas de baixa declividade (até aproximadamente 20%).

Roering et al. (1999) defenderam que em encostas de alta declividade o processo de transporte difusivo de sedimentos depende, de maneira não-linear, do gradiente da encosta. Isto acontece devido ao caráter planar das encostas de alta declividade, onde a convexidade do perfil ocorre apenas próximo ao topo da encosta. Assim, Roering et al. (1999) propuseram uma LTG que aproxima-se de uma lei de difusão linear em baixas declividades e, além disso, indica que o fluxo de sedimento cresce mais rapidamente quando o gradiente aproxima-se de um valor crítico. A LTG proposta por Roering et al. (1999) é:

$$\bar{q}_s = -\frac{K \cdot \nabla e}{1 - (|\nabla e|/S_c)^2} \quad (12)$$

Em que S_c é o gradiente crítico da encosta e pode ser considerado próximo ao ângulo de atrito do solo da encosta. Além disso, o coeficiente K descrito na Eq. (12) não necessariamente é igual àquele da Eq. (11). Esta relação foi elaborada a partir de um balanço entre as forças atuantes nas direções de montante e jusante em determinado ponto na encosta. Roering et al. (1999) testaram e validaram este modelo em sua área de estudo nas cordilheiras do estado do Oregon, EUA.

Heimsath et al. (2005) questionaram o pressuposto de um modelo de transporte baseado apenas nas características difusivas, e propuseram que o transporte também dependeria da espessura do solo. Assim, os autores adotaram outra abordagem, proposta por Furbish e Fagherazzi (2001), onde o transporte de solo é linearmente proporcional ao produto da espessura do solo pelo gradiente superficial:

$$\bar{q}_s = -K \cdot z \cdot \cos \theta \cdot \nabla e \quad (13)$$

Além disso, Roering (2008) propôs um modelo não-linear de dependência entre fluxo de sedimentos e profundidade/declividade. O modelo proposto utiliza a Eq. (12), porém o cálculo do coeficiente de difusividade K envolve a consideração da relação entre declividade da encosta e profundidade do solo em uma função exponencial. Roering (2008) testou esta teoria e a confrontou com as Eqs. (11), (12) e (13). O autor encontrou que o desempenho do modelo de relação não-linear entre fluxo de sedimentos e declividade/profundidade foi o mais satisfatório dentre os testados.

Pelletier e Rasmussen (2009) elaboraram diferentes modelos para a estimativa de profundidades do solo baseados em LTGs. Os modelos propostos baseiam-se no pressuposto de que o solo local atingiu um equilíbrio de longo período em sua espessura. Estes autores calcularam o balanço entre produção (descrita através do modelo exponencial e do arqueado) e erosão do solo (descrita através de três diferentes modelos de transporte de sedimentos não-lineares dependentes da (i) declividade; (ii) área e declividade; e (iii) profundidade e declividade). Comparando seus resultados com dados de campo, os autores concluíram que o modelo arqueado de produção de solo, associado ao modelo de transporte não-linear dependente da profundidade e declividade, foi o mais adequado para sua área de estudo.

Uma análise da evolução da espessura do solo foi realizada por D’Odorico (2000), onde foi utilizado um modelo estocástico de balanço de massa para consideração de eventos aleatórios de escorregamentos, combinado a um processo determinístico de produção de solo a partir da rocha matriz. D’Odorico (2000) relatou que a dinâmica existente no processo de formação das encostas tem dois regimes extremos: (i) limitado pelo intemperismo; e (ii) limitado pelo transporte. Esta dinâmica é biestável, com dois estados preferenciais por entre os quais o sistema pode flutuar devido à ação de forçantes aleatórias (tais como escorregamentos). Assim, em longo prazo, o sistema não tende assintoticamente a permanecer em estado estacionário em algum dos dois extremos. Eventos erosivos aleatórios, por exemplo, podem levar um ponto da encosta, onde a dinâmica é limitada pelo transporte, para uma dinâmica limitada pelo intemperismo, devido à ocorrência de um escorregamento e consequentemente à remoção da camada superficial não consolidada.

Quando o escoamento superficial é existente e capaz de gerar a lavagem superficial (*surface wash*), comumente se considera o transporte de sedimentos através de fenômenos advectivos além dos difusivos (Nicotina et al., 2011). Entretanto a representação destes fenômenos através de LTGs não é trivial, considerando sua natureza estocástica. Além disso, alguns processos, como a erosão laminar, são entendíveis e passíveis de descrição em investigações pontuais, porém, tornam-se de difícil caracterização quando analisados ao longo de escalas geomorfológicas inseridos na dinâmica da paisagem. Os modelos existentes tendem a (i) ser demasiadamente empíricos ou (ii) demasiadamente parametrizados para serem aplicáveis no contexto de modelagem geomorfológica (Dietrich et al., 2003).

Os modelos baseados em LTGs tendem a considerar o transporte ocasionado pelo escoamento superficial através da adição de um termo empírico específico à formulação do vetor de transporte de solo ao longo da encosta:

$$\vec{q}_s = \vec{q}_{sd} + \vec{q}_{sa} \quad (14)$$

Em que \vec{q}_{sd} represente os processos difusivos de transporte na encosta; e \vec{q}_{sa} represente os processos advectivos. Assim, diversos autores (Follain et al., 2006; Saco et al., 2006; Nicotina et al., 2011; Liu et al., 2013) representaram a erosão

laminar em modelos geomorfológicos através da equação:

$$q_{sa} = \beta_2 \cdot q^{\gamma_2} \cdot S^{\alpha_2} \quad (15)$$

Em que q é a descarga por unidade de largura; S é a declividade na direção do fluxo; β_2 é a taxa de transporte de sedimento (análogo ao fator de erosividade dos modelos tradicionais de erosão, por exemplo, USLE); e γ_2 e α_2 são parâmetros de ajuste. O vetor \vec{q}_{sa} tem direção igual àquela assumida pelo fluxo superficial. Considerando que a Eq. (15) é utilizada para simular processos de erosão de longo prazo, a descarga geralmente é interpretada como a descarga de pico média anual, portanto:

$$q = \beta_3 \cdot A^{\gamma_3} \quad (16)$$

Em que β_3 é uma taxa constante de escoamento; A é a área de contribuição por unidade de largura; e γ_3 é um coeficiente de ajuste.

Liu et al. (2013) aplicaram um modelo de predição da profundidade do solo em uma bacia da Pennsylvania, nos EUA. O modelo foi baseado em equações básicas de produção e transporte difusivo e advectivo de solo na encosta. Os autores calibraram seu modelo e o aplicaram em uma simulação de 13.000 anos de evolução da paisagem da bacia. Comparando os dados simulados com os observados, os autores obtiveram um impressionante coeficiente de determinação de aproximadamente 0,74, com erros absolutos menores que 10 cm em 70% das 106 amostragens realizadas. Estes resultados demonstram o potencial de aplicação da técnica para definição da profundidade do solo nos estudos de evolução da paisagem.

Portanto, através da adoção de modelos de produção e transporte de solo, muitos trabalhos vêm aplicando a metodologia baseada em processos na tarefa de mapear a distribuição espacial da profundidade do solo nas bacias. Entretanto, os modelos descritos requerem dados de entrada de qualidade, tais como informações extraídas da topografia e parâmetros e coeficientes utilizados para solução das equações. Além disso, alguns processos relevantes na dinâmica da variação da profundidade do solo são desconsiderados, por exemplo, os movimentos de massa abruptos. Por isso, embora embasados em uma teoria robusta, algumas das aplicações de tais modelos falham na estimativa da profundidade do solo nas encostas.

Nicotina et al. (2011), ao aplicar seu modelo, obtiveram um coeficiente de Nash-Sutcliffe de apenas 0,1 comparando dados calculados e observados de profundidade do solo, evidenciando o baixo desempenho do modelo. Os autores pontuaram ainda que o seu modelo não necessita de calibração, visto que todos os parâmetros de entrada são mensuráveis, e associaram a este fato o mal desempenho. Ainda assim, estes autores consideram que o modelo pode ser usado para descrever um comportamento médio da profundidade do solo na bacia e seria útil para mapeamentos preliminares.

Limites da profundidade do solo

Processos, tais como os movimentos de massa (escorregamentos, fluxos de detritos, entre outros), que certamente contribuem para o transporte de sedimento nas encostas, ainda não foram objetos de elaboração de LTGs parametrizadas e validadas (Dietrich et al., 2003). Entretanto, alguns trabalhos foram desenvolvidos no sentido de contabilizar a influência de tais processos na evolução da paisagem e profundidade dos solos. Schmidt e Montgomery (1995), através da análise de equilíbrio limite bidimensional de Cullman, previram uma relação limite entre declividade da encosta e o relevo, de forma que a altura máxima de determinada encosta (H_c) seria limitada pela seguinte equação:

$$H_c = \frac{4c}{\rho_s \cdot g} \frac{\sin \theta \cdot \cos \phi}{[1 - \cos(\theta - \phi)]} \quad (17)$$

Em que c é a coesão do solo; g é a aceleração gravitacional e ϕ é o ângulo de atrito interno do solo. Baseado nesta equação, Densmore et al. (1998) definiram uma função de probabilidade de falha para cada ponto localizado na encosta, agregando um fator que varia de acordo com o tempo e que aumenta conforme o passar do tempo a partir da ocorrência do último escorregamento.

Além disso, Iida (1999), embasado em análises de equilíbrio limite (Fator de Segurança – FS) para modelos de encosta infinita, definiu limites de profundidade do solo. Iida (1999) determinou o valor da máxima profundidade que poderia se estabelecer em uma encosta considerando que o FS de determinado local não atinja valores menores que 1. No caso de encostas declivosas, escorregamentos podem vir a ocorrer sem saturação do solo, ou seja, com ausência de água. Desta maneira, a profundidade limite (z_{c0}) foi descrita por:

$$z_{c0} = \frac{c}{\rho_s \cdot g \cdot \cos^2 \theta \cdot (\cos \theta - \tan \phi)} \quad (18)$$

Sendo que z_{c0} nunca é alcançado, visto que a profundidade do solo aumenta lentamente com o tempo e tempestades periódicas produzirão alguma saturação na encosta, ocasionando escorregamentos.

Quando o solo encontra-se completamente saturado, também é possível estabelecer uma profundidade limite (z_{c1}), dada por:

$$z_{c1} = \frac{c}{\cos^2 \theta \cdot [\rho_s \cdot g \cdot (\tan \theta - \tan \phi) + \rho_s \cdot g \cdot \tan \phi]} \quad (19)$$

Quando a profundidade real do solo é menor que z_{c1} , então não haverá possibilidade de ocorrência de escorregamento, mesmo com uma grande tempestade. Neste caso, este local adquire característica de imunidade por determinado período. Se a profundidade do solo é maior que z_{c1} , então os escorregamentos podem ocorrer quando a saturação do solo atinge um valor limite. Iida (1999) demonstrou que estes valores críticos de profundidade têm boa aderência com valores medidos em campo.

Michel e Kobiyama (2014) basearam-se na teoria de encosta infinita combinada a um modelo hidrológico de estado permanente e uniforme para estabelecer um valor limite da profundidade do solo (z_c) relacionado ao padrão médio de saturação do solo da bacia. A equação que descreve esta profundidade limite é:

$$z_c = \frac{\frac{c}{\rho_s \cdot g \cdot \cos \theta} - \frac{\rho_w \cdot p \cdot a \cdot \tan \phi}{\rho_s \cdot b \cdot k_s \cdot \sin \theta}}{\sin \theta - \cos \theta \cdot \tan \phi} \quad (20)$$

Em que p é a taxa de recarga uniforme do solo; a é a área de contribuição a montante; b é o comprimento do contorno e k_s é a condutividade hidráulica saturada do solo. Embora os autores não tenham comparado os valores de profundidade obtidos através da aplicação da Eq. (20) com dados de campo, esta demonstrou comportamento coerente ao ser aplicada a uma encosta hipotética. O resultado da aplicação das Eqs. (18), (19) e (20) a uma encosta hipotética, bem como a coerência existente entre os valores calculados estão apresentados na Figura 2. O desempenho dessas três equações deverá ser avaliado com dados obtidos através dos métodos de campo.

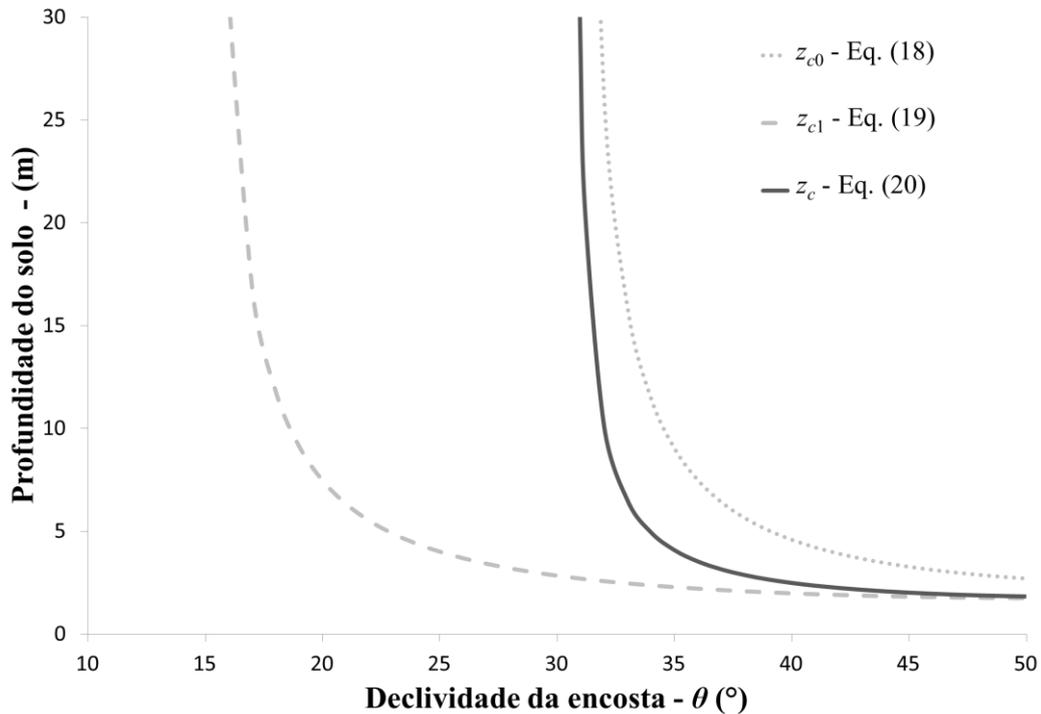


Figura 2 – Comportamento da profundidade limite para diferentes valores de declividade em uma encosta hipotética. Parâmetros utilizados: $c = 11,9$ kPa; $\rho_s = 1.800$ kg/m³; $\rho_w = 1.000$ kg/cm³; $p = 0,005$ m/d; $a = 300$ m²; $b = 5$ m, $\phi = 30,5^\circ$; $k_s = 0,38$ m/d.

Conclusões

Atualmente, a estimativa da distribuição espacial da profundidade do solo se configura em uma das tarefas mais difíceis e importantes para diversos ramos da ciência que necessitam desta informação. Segundo Dietrich et al. (1995), a estimativa da profundidade do solo é extremamente difícil e trabalhosa, mesmo para pequenas bacias hidrográficas. Associado a isto, a distribuição espacial da profundidade do solo é controlada por diversos fatores (Tesfa et al., 2009), tornando este parâmetro uma das variáveis físicas menos compreendidas pela comunidade científica dentro dos sistemas de encostas (Catani et al., 2010). Desta maneira, o presente trabalho é o segundo artigo de uma revisão de métodos de estimativa da profundidade do solo. Este artigo abordou os métodos matemáticos utilizados para esta estimativa, enquanto que, o primeiro artigo (Michel e Kobiyama, submetido) tratou dos métodos de campo.

Os métodos matemáticos para tal finalidade foram classificados neste trabalho em estatísticos, empíricos e baseados em processos. Os métodos estatísticos avançaram muito nas últimas décadas, principalmente devido à evolução dos *softwares* SIG, que possibilitou a

fácil aplicação das ferramentas de geoestatística. Assim, diversos atributos passaram a ser considerados nestas análises, na tentativa de relacioná-los com a profundidade do solo. Desta maneira, os modelos estatísticos demonstram atualmente uma imensa capacidade de estimar a distribuição espacial da profundidade do solo. Entretanto, a aplicação destes modelos requer uma grande quantidade de dados mensurados (tanto em relação às variáveis preditoras, quanto à variável estimada), para que seja possível estabelecer as relações existentes. Além disso, sempre que tal método for aplicado a uma nova área de estudo, uma nova formulação do modelo deve ser elaborada.

Os métodos empíricos são de fácil aplicabilidade. Os modelos empíricos baseados em relações que expressam os processos físicos relacionados à formação dos solos, mesmo sem o uso explícito de equações fisicamente embasadas, vêm apresentando resultados satisfatórios. Porém, aqueles que não se constituem de tentativas enfáticas de representar os processos físicos atuantes no estabelecimento da profundidade do solo, têm fracassado. Desta maneira, percebe-se que quanto mais o modelo empírico aproxima-se de um modelo fisicamente embasado, melhores

são seus resultados. Assim, conforme Godt et al. (2008), em ambientes onde as taxas de produção e transporte do solo podem ser bem definidas, o uso de modelos baseados em processos tende a exibir melhores resultados. Portanto, a aplicação dos modelos empíricos torna-se mais adequada para locais onde o equacionamento dos processos físicos atuantes ainda não foi elaborado, parametrizado e/ou testado; ou onde existe uma limitação de dados de campo necessários para aplicação de outros tipos de modelagem.

Os modelos baseados em processos têm a característica de utilizar equações fisicamente embasadas relativas aos mecanismos de produção, transporte e estabilidade dos solos. Assim, para locais onde existem dados de qualidade (topográficos, pedológicos, geológicos, entre outros) e já foram definidas as LTGs referentes aos processos atuantes, há um bom desempenho destes modelos. Entretanto, é importante lembrar que os modelos baseados em processos geralmente descrevem a evolução da profundidade do solo em termos de escalas geomorfológicas de tempo. Por isso, muitos processos estocásticos abruptos que influenciam drasticamente no padrão de distribuição da profundidade do solo ainda não foram objetos de LTGs. Desta maneira, ainda existe a necessidade de se avançar no estudo destes processos para alavancar o desenvolvimento de novas LTGs, possibilitando a elaboração de um modelo mais abrangente. O estabelecimento de limites de profundidade do solo baseados em características geomorfológicas, hidrológicas e de resistência dos solos pode ser importante para o aprimoramento das LTGs e conseqüentemente dos MEPS.

Enfim, mesmo que este trabalho tenha dividido as técnicas de estimativa da profundidade do solo em métodos de campo e métodos matemáticos, observou-se que, em um contexto de estudos espacialmente distribuídos, há uma interdependência entre ambos. Os métodos de campo fornecem informações pontuais ou relativas a pequenas áreas e, desta maneira, necessitam dos métodos matemáticos para geração de informações mais abrangentes sobre toda a área de estudo. Os métodos matemáticos, por sua vez, necessitam de dados de campo para sua calibração e validação. Assim, percebe-se a necessidade de intensificação do uso de ambos os métodos. Os métodos matemáticos devem ser intensificados com o intuito de identificar as técnicas mais adequadas para elaborar a distribuição espacial da profundidade do solo. Este objetivo somente será alcançado com dados suficientes, gerados através dos métodos de

campo, para calibrar e validar os modelos e assim possibilitar a escolha do mais adequado.

Referências

- Ahmed, S., De Marsily, G., 1987. Comparison of geostatistical methods for estimating transmissivity using data on transmissivity and specific capacity. *Water Resources Research* 23, 1717-1737.
- Beven, K. J., Kirkby, M. J., 1979. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Bulletin* 24, 43-69.
- Bourennane, H.; King, D., Couturier, A., 2000. Comparison of kriging with external drift and simple linear regression for predicting soil horizon thickness with different sample densities. *Geoderma* 97, 255-271.
- Breiman, L., 2001. Random Forests. *Machine Learning* 45, 5-32.
- Burrough, P. A., 1989. Fuzzy mathematical methods for soil survey and land evaluation. *Journal of Soil Scienc*, 40, 477-492.
- Catani, F., Segoni, S., Falorni, G., 2010. An empirical geomorphology-based approach to the spatial prediction of soil thickness at catchment scale. *Water Resources Research* 46, 1-15, W05508.
- Chang, D., Islam, S., 2000. Estimation of Soil Physical Properties Using Remote Sensing and Artificial Neural Network. *Remote Sensing of Environment* 74, 534-544.
- Chaplot, V., Lorentz, S., Podwojewski, P., Jewitt., 2010. Digital mapping of A-horizon thickness using the correlation between various soil properties and soil apparent electrical resistivity. *Geoderma* 157, 154-164.
- Culling, W. E. H., 1960. Analytical theory of erosion. *Journal of Geology* 68, 336-344.
- Culling, W. E. H., 1963. Soil creep and the development of hillside slopes. *Journal of Geology*, 71(2), 127-161.
- D'odorico, P., 2000. A possible bistable evolution of soil thickness. *Journal of Geophysical Research* 105(B11), 25.927-25.935.
- Dahlke, H. E., Behrens, T., Seibert, J., Andersson, L., 2009. Test of statistical means for the extrapolation of soil depth point information using overlays of spatial environmental data and bootstrapping techniques. *Hydrological Processes* 23, 3017-3029.
- Densmore, A. L., Ellis, M. A., Anderson, R. S., 1998. Landsliding and the evolution of normal fault-

- bounded mountains. *Journal of Geophysical Research* 103(B7), 15.203-15.219.
- Dietrich, W. E., Reiss, R., Hsu, M., Montgomery, D. R., 1995. A process-based model for colluvial soil depth and shallow landsliding using digital elevation data. *Hydrological Processes* 9, 383–400.
- Dietrich, W.E., Bellugi D., Heimsath A.M., Roering J.J., Sklar L., Stock, J.D., 2003. Geomorphic transport laws for predicting landscape form and dynamics, in: Wilcock, P., Iverson, R. (Org.) *Prediction in Geomorphology, Geophysical Monograph Series*. Washington, D.C, pp. 103-123.
- Fisher, Ra., 1936. The Use of Multiple Measurements in Taxonomic Problems. *Annals of Eugenics* 7, 179–188.
- Florinsky, I. V., Eilers, R. G., Manning, G. R., Fuller, L.G., 2002. Prediction of soil properties by digital terrain modelling. *Environmental Modelling & Software* 17, 295–311.
- Follain, S., Minasny, B., McBratney, A. B., Walter, C., 2006. Simulation of soil thickness evolution in a complex agricultural landscape at fine spatial and temporal scales. *Geoderma* 133, 71–86.
- Furbish, D. J., Fagherazzi, S., 2001. Stability of creeping soil and implications for hillslope evolution. *Water Resources Research* 37, 2607-2618.
- Furley, P. A., 1976. Soil-Slope-Plant Relationships in the Northern Maya Mountains, Belize, Central America. III. Variations in the Properties of Soil Profiles. *Journal of Biogeography* 3, 303–319.
- Gershenfeld, N. A., 1999. *The Nature of Mathematical Modeling*. Cambridge, Cambridge University Press. UK.
- Gessler, P. E., Chadwick, O. A., Chamran, F., Althouse, L., Holmes, K., 2000. Modeling Soil-Landscape and Ecosystem Properties Using Terrain Attributes. *Soil Science Society of America Journal* 64, 2046–2056.
- Gessler, P. E., Moore, I. D., Mckenzie, N. J., Ryan, P. J., 1995. Soil-landscape modelling and spatial prediction of soil attributes. *International Journal of Geographical Information Systems* 9, 421–432.
- Godt, J. W., Baum, R. L., Savage, W. Z., Salciarni, D., Schulz, W. H., Harp, E. L., 2008. Transient deterministic shallow landslide modeling: Requirements for susceptibility and hazard assessments in a GIS framework. *Engineering Geology* 102, 214–226.
- Grayson, R., Bloschl, G., 2000. *Spatial Patterns in Catchment Hydrology: Observations and Modelling*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Hastie, T., Tibshirani, R., Friedman, J., 2009. *The elements of statistical learning – Data mining, inference and prediction*. 2 ed. New York: Springer.
- Heimsath, A. M., Dietrich, W. E., Nishiizumi, K., Finkel, R. C., 2001. Stochastic processes of soil production and transport: erosion rates, topographic variation and cosmogenic nuclides in the oregon coast range. *Earth Surface Processes and Landforms* 26, 531–52.
- Heimsath, A. M., Dietrich, W. E., Nishiizumi, K., 1997. The Soil Production Function and Landscape Equilibrium. *Nature* 388, 358–361.
- Heimsath, A. M., Furbish, D. J., Dietrich, W. E., 2005. The illusion of diffusion: Field evidence for depth-dependent sediment transport. *Geology* 33, 949–952.
- Hengl, T., Heuvelink, G. B. M., Stein, A., 2004. A generic framework for spatial prediction of soil variables based on regression-kriging. *Geoderma* 120, 75–93.
- Hirano, M., 1975. Simulation of developmental process of interfluvial slopes with reference to graded form. *Journal of Geology* 83, 113–123.
- Iida, T., 1999. A stochastic hydro-geomorphological model for shallow landsliding due to rainstorm. *Catena* 34, 293–313.
- Kirkby, M.J., 1971. Hillslope process-response models based on the continuity equation. *Institute of British Geographers Special Publication* 3, 15–30.
- Knotters, M., Brus, D. J., Oude Voshaar, J. H., 1995. A comparison of kriging, co-kriging and kriging combined with regression for spatial interpolation of horizon depth with censored observations. *Geoderma* 67, 227–246.
- Kravchenko, A., Bullock, D., 1999. A comparative study of interpolation methods for mapping soil properties. *Agronomy Journal* 91, 393–400.
- Kreznor, W. R., Olson, K. R., Banwart, W. L., Johnson, D. L. Soil, Landscape, and Erosion Relationships in a Northwest Illinois Watershed. *Soil Science Society of America Journal* 53, 1763–1771, 1989.
- Kuriakose, S. L., Devkota, S., Rossiter., Jetten, V. G., 2009. Prediction of soil depth using environmental variables in an anthropogenic landscape, a case study in the Western Ghats of Kerala, India. *Catena* 79, 27–38.
- Lane, P. W., 2002. Generalized linear models in soil science. *European Journal of Soil Science* 53, 241–251.
- Liu, J., Chen, X., Lin, H., Liu, H., Song, H., 2013. A simple geomorphic-based analytical model for predicting the spatial distribution of soil thickness

- in headwater hillslopes and catchments. *Water Resources Research* 49, 7733–7746.
- McBratney, A. B., Mendonça Santos, M. L., Minasny, B., 2003. On digital soil mapping. *Geoderma* 117, 3–52.
- McIntosh, P. D., Lynn, I. H., Johnstone, P. D., 2000. Creating and testing a geometric soil-landscape model in dry steeplands using a very low sampling density. *Australian Journal of Soil Research* 38, 101-112.
- McKean, J. A., Dietrich, W. E., Finkel, R. C., Southon, J. R., Caffee, M. W., 1993. Quantification of soil production and downslope creep rates from cosmogenic ¹⁰Be accumulations on a hillslope profile. *Geology* 21, 343-346.
- McKenzie, N. J., Austin, M. P., 1993. A quantitative Australian approach to medium and small scale surveys based on soil stratigraphy and environmental correlation. *Geoderma* 57, 329–355.
- McKenzie, N. J., Ryan, P. J., 1999. Spatial prediction of soil properties using environmental correlation. *Geoderma* 89, 67-94.
- Michel, G. P., Kobiyama, M., 2014. Estabelecimento de limites para profundidade do solo de encostas com base no fator de segurança. *Revista Geonorte Edição Especial* 4 10, 103-108.
- Michel, G. P., Kobiyama, M., (submetido). Estimativa da profundidade do solo: Parte 1 – Métodos de campo. *Revista Brasileira de Geografia Física*.
- Moore, I. D., Gessler, P. E., Nielsen, G. A., Peterson, G. A., 1993. Soil Attribute Prediction Using Terrain Analysis. *Soil Science Society of America Journal* 57, 443–452.
- Murphy, B., Vaze, J., Teng, J., Tuteja, N. K., Gallant, J., Summerell, G., Young, J., Wild, J., 2005. Modelling landscapes using terrain analysis to delineate landforms and predict soil depths – examples from catchments in NSW. In: *MODSIM - International Congress on Modelling and Simulation*, pp. 1423-1429.
- Nicótina, L., Tarboton, D. G., Tesfa, T. K., Rinaldo, A., 2011. Hydrologic controls on equilibrium soil depths. *Water Resources Research* 47, 1-11, W04517.
- Odeh, I. O. A., McBratney, A. B., Chittleborough, D. J., 1995. Further results on prediction of soil properties from terrain attributes: heterotopic cokriging and regression-kriging. *Geoderma* 67, 215–226.
- Odeh, I. O. A., McBratney, A. B., Chittleborough, D. J., 1994. Spatial prediction of soil properties from landform attributes derived from a digital elevation model. *Geoderma* 63, 197–214.
- Oliver, M. A., Webster, R., 1990. Kriging: a method of interpolation for geographical information systems. *International journal of geographical information systems* 4, 313–332.
- Park, S. J., McSweeney, K. K., Lowery, B. B., 2001. Identification of the spatial distribution of soils using a process-based terrain characterization. *Geoderma* 103, 249–272.
- Pelletier, J. D., Rasmussen, C., 2009. Geomorphically based predictive mapping of soil thickness in upland watersheds. *Water Resources Research* 45, 1–15, W09417.
- Penížek, V., Boruvka, L., 2006. Soil depth prediction supported by primary terrain attributes: A comparison of methods. *Plant, Soil and Environment* 52, 424 – 430.
- Pennock, D. J., Zebarth, B. J., Jong, E. D. E., 1987. *Landform Classification and Soil Distribution in Hummocky Terrain*, Saskatchewan, Canada. *Geoderma* 40, 297–315.
- Robinson, T. P., Metternicht, G., 2006 Testing the performance of spatial interpolation techniques for mapping soil properties. *Computers and Electronics in Agriculture* 50, 97–108.
- Roering, J. J., 2008. How well can hillslope evolution models “explain” topography? Simulating soil transport and production with high-resolution topographic data. *Bulletin of the Geological Society of America* 120, 1248–1262.
- Roering, J. J., Kirchner, J. W., Dietrich, W. E., 1999. Evidence for nonlinear, diffusive sediment transport on hillslopes and implications for landscape morphology. *Water Resources Research* 35(3), 853–870.
- Ryan, P. J., McKenzie, N. J., O’Connell, D., Loughhead, A. N., Leppert, P. M., Jacquier, D., Ashton, L., 2000. Integrating forest soils information across scales: Spatial prediction of soil properties under Australian forests. *Forest Ecology and Management* 138, 139–157.
- Saco, P. M., Willgoose, G. R., Hancock, G. R., 2006. Spatial organization of soil depths using a landform evolution model. *Journal of Geophysical Research* 111, 1-14, F02016.
- Salciarini, D., Godt, J. W., Savage, W. Z., Conversini, P., Baum, R. L., Michael, J. A., 2006. Modeling regional initiation of rainfall-induced shallow landslides in the eastern Umbria Region of central Italy. *Landslides* 3, 181–194.
- Saulnier, G. M., Beven, K., Obled, C., 1997. Including spatially variable effective soil depths in TOPMODEL. *Journal of Hydrology* 202, 158–172.
- Schmidt, J., Tonkin, P., Hewitt, A., 2005. Quantitative soil-landscape models for the Haldon

- and Hurunui soil sets, New Zealand. *Australian Journal of Soil Research* 43, 127–137.
- Schmidt, K. M., Montgomery, D. R., 1995. Limits to relief. *Science* 270, 617-620.
- Schulz, W. H., Lidke, D. J., Godt, J. W., 2008. Modeling the spatial distribution of landslide-prone colluvium and shallow groundwater on hillslopes of Seattle, WA. *Earth Surface Processes and Landforms* 33, 123-141.
- Scull, P., Franklin, J., Chadwick, O. A., McArthur, D., 2003. Predictive soil mapping: a review. *Progress in Physical Geography* 27, 171–197.
- Segoni, S., Rossi, G., Catani, F., 2012 Improving basin scale shallow landslide modelling using reliable soil thickness maps. *Natural Hazards* 61, 85–101.
- Silva, R. V., 2010. Desenvolvimento de um Modelo Hidrológico Distribuído por Meio de Células Voronoi com Consideração das Profundidades do Solo. Tese (Doutorado). Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina.
- Sinowski, W., Auerswald, K., 1999. Using relief parameters in a discriminant analysis to stratify geological areas with different spatial variability of soil properties. *Geoderma* 89, 113–128.
- Small, E. E., Anderson, R. S., Hancock, G. S., 1999. Estimates of the rate of regolith production using ¹⁰Be and ²⁶Al from an alpine hillslope. *Geomorphology* 27, 131-150.
- Stone, J. R., Gilliam, J. W., Cassel, D. K., Daniels, R. B., Nelson, L. A., Kleiss, H. J., 1985. Effect of Erosion and Landscape Position on the Productivity of Piedmont Soils. *Soil Science Society of America Journal* 49, 987-991.
- Sumfleth, K., Duttman, R., 2008. Prediction of soil property distribution in paddy soil landscapes using terrain data and satellite information as indicators. *Ecological Indicators* 8, 485–501.
- Tesfa, T. K., Tarboton, D. G., Chandler, D. G., McNamara, J. P., 2009. Modeling soil depth from topographic and land cover attributes. *Water Resources Research* 45, 1-16, W10438.
- Tsai, C. C., Chen, Z. S., Duh, C. T., Horng, F. W., 2001. Prediction of soil depth using a soil-landscape regression model: a case study on forest soils in southern Taiwan. *Proceedings of the National Science Council, Republic of China. Part B, Life sciences* 25, 34–39.
- Tucker, G. E., Hancock, G. R., 2010. Modelling landscape evolution. *Earth Surface Processes and Landforms* 35, 28-50.
- Walker, P. H., Hall, G. F., Protz, R., 1968. Relation between Landform Parameters and Soil Properties. *Soil Science Society of America Journal* 32, 101-104.
- Yee, T. W., Mitchell, N. D., 1991. Generalized additive models in plant ecology. *Journal of Vegetation Science* 2, 587–602.
- Zhu, A. X., Hudson, B., Burt, J., Lubisch, K., Simonson, D., 2001. Soil Mapping Using GIS, Expert Knowledge, and Fuzzy Logic. *Soil Science Society of America Journal* 65, 1463–1472.
- Zhu, A. X., 1997. A similarity model for representing soil spatial information. *Geoderma* 77, 217–242.
- Zhu, A. X., 2000. Mapping soil landscape as spatial continua: The neural network approach. *Water Resources Research* 36, 663–677.
- Zhu, A. X., Band, L. E., Dutton, B., Nimlos, T. J., 1996. Automated soil inference under fuzzy logic. *Ecological Modelling* 90, 123–145.
- Zhu, A. X., Mackay, D. S., 2001. Effects of spatial detail of soil information on watershed modeling. *Journal of Hydrology* 248, 54–77.
- Zhu, A. X., Qi, F., Moore, A., Burt, J. E., 2010. Prediction of soil properties using fuzzy membership values. *Geoderma* 158, 199–206.
- Zhu, A., Band, L., 1994. A knowledge-based approach to data integration for soil mapping. *Canadian Journal of Remote Sensing. Canadian Journal of Remote Sensing/ Journal canadien de télédétection* 20, 404–418.
- Zhu, Q., Lin, H. S., 2010. Comparing ordinary kriging and regression kriging for soil properties in contrasting landscapes. *Pedosphere* 20, 594–606.
- Zhu, A. X., Band, L., Vertessy, R., Dutton, B., 1997. Derivation of Soil Properties Using a Soil Land Inference Model (SOLIM). *Soil Science Society of America Journal* 61, 523–541.
- Ziadat, F. M., 2005. Analyzing digital terrain attributes to predict soil attributes for a relatively large area. *Soil Science Society of America Journal* 69, 1590 - 1599. .
- Ziadat, F. M., 2010. Prediction of soil depth from digital terrain data by integrating statistical and visual approaches. *Pedosphere* 20, 361–367.