

## Pedologia ou Pedometria? Modelo discreto ou contínuo? Mapeamento tradicional ou digital?

Maria de Lourdes Mendonça Santos  
Celso Valner Manzatto

O termo **Pedometria** foi formalmente definido por Webster (1994): "*Pedometrics is a neologism derived from the Greek roots, pedos (soil) and metron (measurement), and is formed and used analogously to others words such as biometrics, econometrics...and the oldest of all geometrics*". Essa definição deixa claro o caráter **quantitativo**, o qual tem sido incorporado à Ciência do Solo por meio dos métodos matemáticos, estatísticos e numéricos, bem como **solo** ou *pedon*, que corresponde à parte da Ciência do Solo que denominamos de **Pedologia**. Em outras palavras, Pedometria trata de Pedologia quantitativa ou de métodos quantitativos aplicados à Pedologia.

A Pedometria em si não é nova, pois métodos matemáticos e estatísticos têm sido aplicados à Ciência do Solo desde os anos 60, conforme revisão apresentada por Yaalon (1975) (Figura 1). Sua origem remonta a Jenny (1941), que, de forma simplificada (aparentemente), conseguiu expressar as complexas relações envolvidas no processo de formação dos solos, estabelecidas por Dokuchaev ainda nos primórdios da Ciência do Solo: o solo é o resultado da interação entre cinco fatores: clima, organismos, relevo, material de origem e tempo. Os quatro primeiros fatores, interagindo no tempo, criam uma série de processos específicos, que levam à diferenciação em horizontes e, conseqüentemente, à formação do solo.

Jenny expressou de maneira quantitativa as complexas relações entre os fatores de formação dos solos por meio da equação  $S = f(\text{cl. o.r.p.t.})$ . Essa equação, aparentemente tão simples, tem para cada uma de suas partes uma explicação e correlações complexas, as quais ele detalha em seu livro pioneiro e sempre muito atual, intitulado "*Factors of Soil Formation – A system of Quantitative Pedology*". Através dessa equação, Jenny admite que as propriedades do solo podem ser mensuradas

quantitativamente e expressas numericamente, por meio de correlações matemáticas. Essa equação teórica permitiu a Jenny prever a distribuição de propriedades do solo com base em variáveis externas e *a priori* de observações de campo. A partir de então, pedólogos do mundo inteiro tomaram a via quantitativa para tentar formalizar a famosa equação de Jenny através de estudos de caso, em que um dos fatores varia e os demais são mantidos constantes, originando funções quantitativas conhecidas como "climofunções", "topofunções", etc. A maior parte desses trabalhos foi desenvolvida antes da existência de sofisticados métodos numéricos e computacionais. As "climofunções", por sinal foram as mais desenvolvidas por Jenny para a predição da ocorrência de tipos ou propriedades de solos.

Por que então considerar a Pedologia Quantitativa ou Pedometria uma novidade ou contraponto à Pedologia puramente qualitativa ou tradicional? Como não considerar nos dias atuais o acelerado desenvolvimento de ciências e tecnologias correlatas, Ciência da Computação, Sensoriamento Remoto, Sistemas de Informação Geográfico, GPS (Global Positioning System), Banco de Dados, Geostatística, Redes Neurais e outros, que contribuem com ferramentas que podem ampliar o horizonte da Ciência do Solo? A Pedologia, como um todo, nada mais fez que evoluir de acordo com a evolução do meio e a disponibilidade dos recursos computacionais e tecnológicos, como era de se esperar em qualquer ciência.

Essa evolução, ilustrada na figura 1 (McBratney et al., 2000), mostra que com o tempo, a diferença entre a abordagem tradicional e a quantitativa está diminuindo e, mesmo, deixando de existir quando a tecnologia e o conhecimento formal se unem para produzir informações relevantes para a sociedade como um todo.

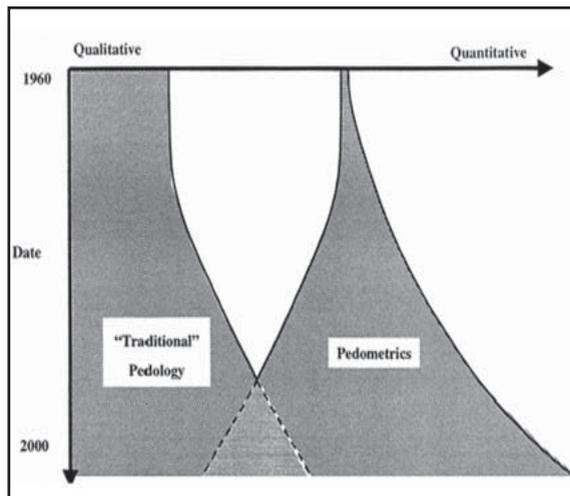


Figura 1 – Evolução temporal das abordagens pedológicas qualitativa e quantitativa.

O conhecimento dos solos só pode se beneficiar do desenvolvimento da Ciência e da Tecnologia. A dicotomia *pedologia tradicional x pedologia quantitativa* é apenas aparente e não se sustenta, visto que a predição de classes e, ou, propriedades de solos necessita de ambas as abordagens, quantitativa e qualitativa, ou seja, não prescinde do conhecimento qualitativo dos solos e mesmo o incorpora nos modelos, mas utiliza métodos e técnicas quantitativas, e, evidentemente, de todo o avanço disponível, e do bom senso, antes de tudo!

Talvez a grande mudança, ou “novidade”, resida no paradigma de mapeamento dos solos. Nesse sentido, existem duas abordagens diferentes: o modelo discreto e o modelo contínuo, amplamente discutido por diversos autores (Baize, 1986; Aubert & Boulaine, 1989; Lark & Beckett, 1998).

Assim, o levantamento e mapeamento dito “tradicional” é também um modelo e fundamenta-se no conceito de solos como um “corpo natural”, “indivíduo”, com características próprias, completo e indivisível. Um **“corpo natural”** assim definido, constitui partes separáveis do solo como um *continuum* na superfície da terra (Cline, 1949). Estas partes individuais, ou “corpos naturais”, compondo o *continuum* são chamadas de unidades de referência, idealizadas para sustentar sistemas taxonômicos e unidades de mapeamento de

solos. Unidades de referência dependem de limites e conceitos impostos pelo homem para atender aos diversos esquemas de classificação taxonômica de solos. É necessário assinalar que aqui se fala de conceitos, não de solos reais. Em taxonomia de solos, o modelo usado pelo pedólogo para criar as classes de solos e determinar seus limites é um modelo mental intuitivo, determinístico, que assume a existência de forte correlação entre os tipos de solos e o ambiente onde eles se encontram. Trata-se de uma abordagem essencialmente qualitativa, de natureza empírico-determinística, realizada com base na análise da fisiografia da paisagem e na interpretação de fotografias aéreas, pelo pedólogo.

Essa abordagem, baseada no modelo discreto, descreve características dos solos de uma determinada área, classifica-os de acordo com um sistema taxonômico vigente, estabelece limites entre classes definidas no mapa e permite fazer inferências sobre o comportamento dos solos quanto ao uso e ao manejo. O modelo discreto tem como pressuposto que fatores de formação (*cl.o.r.p.t.*) controlam a distribuição dos diferentes solos na paisagem.

Com base nesses conceitos, pressupostos e, principalmente, experiência de campo, as características locais de topografia e vegetação são interpretadas qualitativamente como indícios de combinações dos fatores de formação dos solos, e limites abruptos entre classes e propriedades dos solos dentro dos limites de classes são definidos. É assumido que para esses indivíduos separados por limites intuitivos as características ou o “tipo” de solo varia(m) abruptamente nesses limites. Além disso, sua representação espacial tem sido sempre discreta, na forma de mapas do tipo “Choropleth”, com limites abruptos entre as chamadas “unidades de mapeamento”. Em geral, cada unidade de mapeamento contém 3-4 classes ou “tipo” de solos, variando em sua proporção de ocorrência. A unidade de mapeamento pode então ser representada por um único tipos de solo, ou pelo chamado “perfil representativo” (Soil Survey Staff, 1983). Dessa forma, o valor predito de um atributo do solo em qualquer ponto não amostrado será

o valor do *pedon* típico ou o valor médio da unidade de mapeamento. A exatidão dos valores preditos estará, dessa maneira, sujeita à homogeneidade das unidades de mapeamento, ou seja, à variância interna à unidade, e nenhuma estimativa de erro é apresentada com o mapa ou a legenda.

Indivíduos criados por meio desse modelo mental e expressos de forma discreta são artificiais, mas são informativos e foram por muito tempo a única opção de representação espacial de uma realidade sabidamente contínua, os solos.

Esse paradigma, no entanto, ignora ambos, a variabilidade espacial dos fatores de formação do solo e do próprio solo resultante, como demonstrado em vários trabalhos (Burgess & Webster, 1980, 1984; Burgess et al., 1981). Portanto, em universos de natureza contínua, como é o solo, o modelo discreto não é realístico, porque os limites naturais na paisagem são, acima de tudo, graduais, e não abruptos e, como enfatizado por Jenny (1941): *"Often it is not sufficiently realized that the boundary between soil and environment is artificial and that no two soil scientists have exactly the same enclosure of the soil system in mind"*.

O modelo dito contínuo trata o problema da variabilidade do solo sob uma ótica diferente. Nesse modelo, assume-se que as características dos solos variam gradualmente no espaço e que assim devem ser representadas. Os modelos geoestatísticos foram então aplicados à Ciência do Solo, na tentativa de representar a variabilidade espacial do solo e sua representação contínua, a exemplo de estudos geológicos sobre ocorrências de minerais.

A busca de soluções para resolver as incertezas inerentes ao método tradicional, e ao mesmo tempo, para exprimir a complexidade da combinação resultante dos fatores de formação do solo e o avanço na base de conheci-

mento sobre modelagem e variabilidade espacial impulsionaram o desenvolvimento dos métodos quantitativos aplicados à Ciência do Solo (ou Pedometria) nos últimos 30-40 anos. Um volume especial da revista *Geoderma* foi inteiramente reservado ao tema: vol.97, ns. 3-4 de 2000, incorporando uma seleção de trabalhos apresentados no Simpósio 17 do XVI Congresso Mundial de Ciência do Solo, intitulado "Advances in Soil Survey using modern tools", e do Simpósio intitulado "Recent Advances in Soil Geostatistics", ambos realizados em Montpellier, França, em 1998 e sob os auspícios da União Internacional de Ciência do Solo.

Atualmente a Pedometria tem se utilizado de diversas abordagens quantitativas, principalmente a Geoestatística, a Lógica de Conjuntos Nebulosos ou "Fuzzy" e a Inteligência Artificial, para descrever, classificar e estudar os padrões de variação espacial dos solos na paisagem, com a vantagem adicional de se conhecer a exatidão e a qualidade da informação (McBratney et al., 1981; Burgess et al., 1981; Voltz & Webster, 1990; De Gruijter & McBratney, 1988; Voltz et al., 1997). Contudo, a Geoestatística tem seus pressu-

postos, os quais nem sempre correspondem à realidade da variabilidade dos solos na paisagem.

Para solucionar quantitativamente a equação de Jenny (1941), McBratney et al. (2000) propuseram então aliar em um modelo determinístico-estocástico o conhecimento pedológico sobre os processos de formação e distribuição dos solos na paisagem (método cl.o.r.p.t.), com técnicas quantitativas usadas em Pedometria, com a finalidade de prever com maior rapidez e exatidão, e a um custo mais baixo, as classes e, ou, propriedades dos solos para uma determinada região.

Esse modelo combinando os dois métodos através da derivação da correlação não-linear entre os fatores ambientais exógenos que in-

*"A diferença entre a abordagem tradicional e a quantitativa deixa de existir quando a tecnologia e o conhecimento formal se unem para produzir informações relevantes para a sociedade".*

fluenciam os processos multivariados de formação do solo e os métodos geoestatísticos, também multivariados e usados para interpolação espacial dos valores preditos ou de seus resíduos, evoluíram para o que hoje se chama em inglês, "*Digital Soil Mapping – DSM*" ou modelagem e mapeamento digital (e não digitalizado, pois não se trata de digitalização de mapas de solos existentes) de classes e propriedades de solos.

O estado da arte em DSM, incluindo as premissas, os princípios, os métodos, as aplicações e os dados necessários para executar o mapeamento digital de classes e propriedades e solos, foi apresentado de forma ampla por McBratney et al. (2003) na revista *Geoderma*, constituindo-se em referência no assunto. Uma definição formal, no entanto, só foi apresentada para a comunidade científica em 2004, durante o "*1 Global Workshop on Digital Soil Mapping*", realizado em Montpellier, França. Os artigos apresentados no evento foram recentemente publicados na forma de livro, intitulado "*Digital Soil Mapping – An introductory perspective*", na série *Developments in Soil Science*, volume 31 da Elsevier.

De acordo com Lagacherie & McBratney (2007), Mapeamento Digital de Solos é definido como a "criação e população de sistemas espaciais de informação de solos, através do uso de modelos numéricos para a inferência das variações espaciais e temporais dos tipos de solos e de suas propriedades, a partir de observações e conhecimento dos solos e de variáveis ambientais correlacionadas".

Na revisão sobre o estado da arte em DSM, McBratney et al. (2003) apresentaram uma proposta genérica de protocolo para DSM, adaptando o modelo teórico de Jenny (1941), visando não apenas explicar as relações entre os fatores de formação do solo, mas, sobretudo, prever quantitativamente como funções espaciais, os solos (classes e, ou, propriedades). Esse modelo é chamado de *s.c.o.r.p.a.n.*:

$$S_{c,p} = f(s.c.o.r.p.a.n.), \text{ em que:}$$

$S_{c,p}$  (solo, classe ou propriedade);

**s**: solo - outras propriedades do solo num dado ponto; **c**: clima- propriedades climáticas do ambiente num dado ponto; **o**- organismos, vegetação, atividade humana; **r**- topografia, atributos da paisagem; **p**- material de origem, litologia; **a**- o fator tempo; **n**- espaço, posição espacial. É uma fórmula generalizada do modelo de Jenny, que inclui a posição espacial (**n**) como condição para o mapeamento digital. Uma outra novidade é a possibilidade de prever o solo a partir de informação sobre ele (mapas existentes de classes e propriedades ou mesmo « expert knowledge », ou seja, o conhecimento formal do pedólogo).

*"É preciso fornecer não apenas mapas, mas bancos de dados, informação e conhecimento de âmbito global e de fácil acesso".*

Nessa revisão são ainda discutidos os diversos métodos que podem ser usados para modelar o "**f**" da equação, ou seja, para prever de forma quantitativa as relações entre classes e propriedades dos solos com o seu ambiente, como os modelos lineares generalizados, as árvores de regressão e de classificação, as redes neurais, os sistemas "fuzzy" e a geoestatística.

Os dados e informações sobre as variáveis ambientais utilizadas na construção dos modelos também são discutidos, sendo que as mais comumente usadas são as derivadas do terreno extraídas dos MNT (Modelo Numérico do Terreno), tais como altitude, declividade, etc.) e as bandas espectrais de imagens de satélite. No entanto, há evidências de relações quantitativas com os outros fatores de formação, as quais precisam ser mais bem exploradas e desenvolvidas.

O modelo *s.c.o.r.p.a.n.* proposto, juntamente com as funções espaciais de predição de solos e de seus erros, tem se mostrado um método particularmente importante, principalmente para áreas onde os recursos em dados e informações de solos são escassos, como é o caso do território brasileiro.

Em escala global, as organizações responsáveis pela pesquisa aplicada em solo, necessitam de dados e informação de solos que sejam exatos e georeferenciados para fins de planejamento e gestão ambiental e da produtividade, como estudos de potencialidades, susceptibilidades, impactos, resiliência e sustentabilidade. Destaca-se, nesse sentido, a forte demanda por informações pedológicas como apoio aos estudos sobre as Mudanças Climáticas Globais e seu impacto no uso do solo.

De forma generalizada, há escassez de dados de solos no mundo, e, quando esses dados existem, são limitados e, ou, dispersos, o que tem sido denominado de infra-estrutura limitada de dados espaciais de solos. Essa necessidade e a crescente demanda por esses dados e informação sobre os solos têm alavancado o desenvolvimento do mapeamento digital de solos. O desafio maior vai ser o de sistematizar e entender os dados existentes e a eles adicionar os dados produzidos por novos sensores, para responder às demandas da sociedade em relação às complexas ameaças de mudanças ambientais, segurança alimentar, disponibilidade de água, energia e sustentabilidade ambiental.

Justamente sobre o tema de escassez e infra-estrutura limitada de dados espaciais de solos, foi organizado no Rio de Janeiro pela Embrapa Solos e o apoio da União Internacional de Ciência do Solo e da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, o "2nd Global Workshop on Digital Soil Mapping", que reuniu 75 pesquisadores de 17 países, para apresentar e discutir os avanços em mapeamento digital de solos. Os resultados desse Workshop estão sendo sistematizados e serão publicados pela Elsevier na mesma série de Desenvolvimentos e Ciência dos Solos. Outro resultado desse Workshop foi o consenso de se formar um consórcio global de dados e informação so-

bre os solos do mundo, o qual está sendo consolidado na forma de um projeto de pesquisa envolvendo instituições de todo o mundo, com o objetivo de produzir um mapa digital global de propriedades dos solos, com resolução espacial de 90 x 90m, disponibilizando ao mesmo tempo um banco de dados global em solos via Internet e alguns resultados aplicados a áreas com problemas específicos, tais como degradação, contaminação e produtividade dos solos. Mais informações sobre esse projeto podem ser adquiridas em <http://www.globalsoilmap.net/>.

A União Internacional de Ciência do Solo foi sensível a esses avanços e desde 2004 possui um Grupo de Trabalho permanente em Mapeamento Digital de Solos (*Working Group on Digital Soil Mapping*), ligado às Comissões de Geografia do Solo (C1.2) e Pedometria (C1.5). O Grupo [www.digitalsoilmapping.org/](http://www.digitalsoilmapping.org/) conta com partici-

pantes do mundo inteiro e planeja realizar outras conferências e treinamentos e, sobretudo, implementar o projeto de mapeamento global de propriedades do solo supracitado.

No Brasil, diversas iniciativas envolvendo a metodologia de DSM completa ou parcialmente têm sido empreendidas, envolvendo aplicações relativas ao mapeamento de classes e

propriedades de solos tais como estoque de C, disponibilidade de água no solo, desenvolvimento de funções de pedotransferência (PTFs) para estimativas de densidade do solo, ou simplesmente para otimizar o mapeamento tradicional de solos. Esses trabalhos podem ser encontrados na literatura, ou, mais recentemente, nos Anais do *2nd GWDSM (2006)*.

A Ciência do Solo tem, assim, um papel fundamental a desempenhar, fornecendo subsídios à tomada de decisão estratégica e para o estabelecimento de políticas públicas sobre o planejamento de uso e o uso sustentável do recurso natural solo. Para isso, deverá har-

***"O objetivo é produzir um mapa digital global de propriedades dos solos, com resolução espacial de 90 x 90 m, disponibilizado na Internet".***

monizar e usar de forma estratégica seus atributos qualitativos e quantitativos, bem como os recursos técnicos disponíveis para fornecer à sociedade, de forma rápida e a baixo custo, as informações e o conhecimento requeridos. É preciso fornecer não apenas mapas, mas bancos de dados, informação e conhecimento de âmbito global e de fácil acesso. No Brasil, tem-se a excepcional vantagem do conhecimento dos solos tropicais e pedólogos de grande experiência, que têm papel fundamental a desempenhar na construção dos modelos quantitativos de predição de solos, como na Internet.

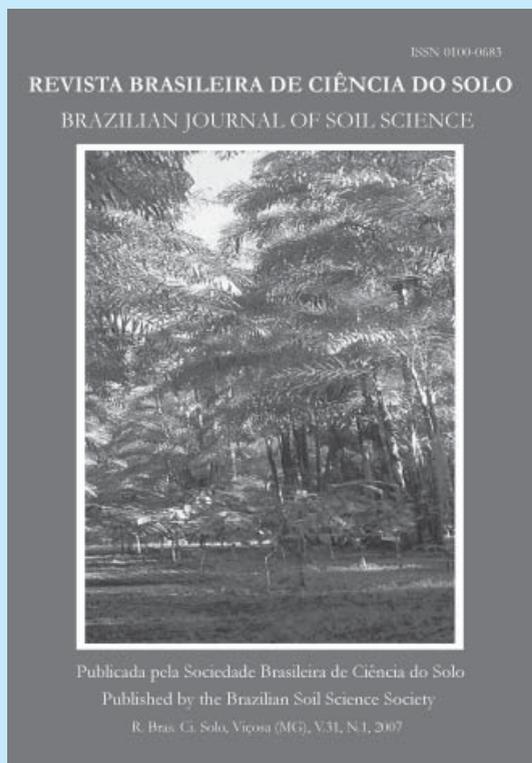
Finalmente, não se pode esquecer de que os modelos são apenas uma representação simplificada de uma realidade complexa, mas que são imprescindíveis para o entendimento do mundo real e para a evolução do conhecimento.

*A bibliografia citada neste artigo pode ser solicitada pelo e-mail: boletimsbcs@ufv.br*

**Maria de Lourdes Mendonça Santos** é Pesquisadora da Embrapa Solos e Coordenadora do 2nd Global Workshop on Digital Soil Mapping . E-mail: [loumendonca@cnps.embrapa.br](mailto:loumendonca@cnps.embrapa.br)

**Celso Vainer Manzatto** é Pesquisador e Chefe Geral da Embrapa Solos. E-mail: [manzatto@cnps.embrapa.br](mailto:manzatto@cnps.embrapa.br)

## Envio de artigos para RBCS somente pelo site



A secretaria executiva da Revista Brasileira de Ciência do Solo chama a atenção dos autores para que enviem trabalhos apenas por meio do site [www.sbcs.org.br](http://www.sbcs.org.br) e não mais em papel ou e-mail. A alteração nessa regra de envio foi promovida há quase um ano; entretanto, alguns autores ainda têm insistido no encaminhamento por e-mail. O sistema desenvolvido para gerenciar o trâmite dos artigos tem conseguido dar mais agilidade ao processo de publicação e a SBCS tem feito o possível para aperfeiçoá-lo ainda mais.

Buscando sempre otimizar recursos que não sacrifiquem a qualidade e de suas publicações, a diretoria executiva da SBCS mudou a gráfica onde a impressão da Revista vinha sendo feita há alguns anos. Por essa razão,

houve um pequeno atraso na distribuição do V.31 N1 que deveria circular no final de fevereiro e foi postado apenas em meados de março. O atraso deve-se à fase de adaptação, mas, na avaliação da SBCS, a qualidade gráfica e a economia de recursos empregados na impressão mostraram-se positivas.