



Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Centro Nacional de Pesquisa de Solos
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento

ISSN 1517-2627

Dezembro, 2003

Documentos 55

Mapeamento Digital de Classes e Atributos de Solos

métodos, paradigmas e novas técnicas

Maria de Lourdes Mendonça-Santos
Humberto Gonçalves dos Santos

Rio de Janeiro, RJ
2003

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

Embrapa Solos

Jardim Botânico, 1024 Jardim Botânico. Rio de Janeiro, RJ
CEP: 22460-000

Fone: (21) 2274.4999

Fax: (21) 2274.5290

Home page: www.cnps.embrapa.br

E-mail (sac): sac@cnps.embrapa.br

Supervisor editorial: *Jacqueline Silva Rezende Mattos*

Revisor de texto: *André Luiz da Silva Lopes*

Normalização bibliográfica: *Cláudia Regina Delaia*

Tratamento de ilustrações: *Rafael Simões Bodas Fernandes*

Edição eletrônica: *Rafael Simões Bodas Fernandes*

1ª edição

1ª impressão (2003): 300 exemplares

Todos os direitos reservados.

A reprodução não-autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

Mendonça-Santos, Maria de Lourdes

Mapeamento digital de classes e atributos de solos: métodos, paradigmas e novas técnicas / Maria de Lourdes Mendonça-Santos e Humberto Gonçalves dos Santos. - Rio de Janeiro : Embrapa Solos, 2003.

19p. - (Embrapa Solos. Documentos; n. 55)

ISSN 1517-2627

1. Solo - Mapeamento - Brasil. 2. Solo - Métodos - Mapeamento. I. Santos, Humberto Gonçalves dos. II. Embrapa Solos (Rio de Janeiro). III. Título. IV. Série.

CDD (21.ed.) 631.4

© Embrapa 2003

Autores

Maria de Lourdes Mendonça-Santos

Pesquisador, Ph.D. Embrapa Solos, Rua Jardim Botânico,
nº 1024, Rio de Janeiro, RJ. CEP: 22460-000.

E-mail: loumendonca@cnps.embrapa.br

Humberto Gonçalves dos Santos

Pesquisador, Ph.D. Embrapa Solos, Rua Jardim Botânico,
nº 1024, Rio de Janeiro, RJ. CEP: 22460-000.

E-mail: humberto@cnps.embrapa.br

Sumário

Introdução, **7**

Métodos de mapeamento de solos e/ou de suas propriedades, **8**

Mapeamento tradicional de solos (método clássico), **9**

Limitações do método tradicional, **11**

Mapeamento digital de solos e/ou de suas propriedades com uso de técnicas quantitativas (Pedometria), **12**

Conclusão, **16**

Referências Bibliográficas, **17**

Mapeamento digital de classes e atributos de solos métodos, paradigmas e novas técnicas

Maria de Lourdes Mendonça-Santos

Humberto Gonçalves dos Santos

Introdução

No Brasil, a execução de mapeamento de solos em todo o território nacional é uma demanda permanente das instituições federais de pesquisa e planejamento, Estados e Municípios, iniciativa privada e organismos internacionais na busca de informações do meio físico para o planejamento da ocupação racional das terras e para a gestão ambiental, conciliando desenvolvimento econômico e social, com a conservação e proteção dos recursos naturais, contemplando assim os requisitos básicos para o desenvolvimento sustentável, previstos na Agenda 21.

Apesar dessa demanda, várias são as limitações para a aquisição de dados de solos e/ou de seus atributos (Ca, Mg, pH, N, C, densidade do solo), como o custo elevado dos levantamentos, a extensão das áreas a serem mapeadas e em alguns lugares, a dificuldade de acesso. A essas limitações, somam-se os problemas de precisão da informação, confiabilidade das interpretações qualitativas e dificuldade de extrapolação da informação para outras áreas.

O uso de técnicas quantitativas para predição espacial em mapeamento de solos e de seus atributos (como os de fertilidade e física) vêm crescendo nesta última década, devido ao avanço na capacidade de processamento dos computadores, o que permite usar de maneira mais rápida e confortável, métodos matemáticos e estatísticos existentes, os quais inclusive, já vinham sendo aplicados à Ciência do Solo, desde a década de 60 (McBratney *et al.*, 2000).

Métodos de mapeamento de solos e/ou de suas propriedades

Quando se fala em métodos de Levantamentos e Mapeamento de Solos, duas abordagens se fazem presentes: a primeira, clássica ou tradicional, chamada de método **Ciorpt**, estabelecida por Dokuchaev nos primórdios da Ciência do Solo, a qual estabelece que o solo é o resultado da interação entre cinco fatores: clima (Climate - **C**), organismos (Organisms - **O**), relevo (Relief - **R**), material de origem (Parent material - **P**) e tempo (Time - **T**). 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 (1941), estabeleceu a seguinte equação para descrever o processo de formação do solo: $S = f(\text{CIORPT})$, sendo o tempo visto como uma variável independente, enquanto as outras são variáveis dependentes; a segunda abordagem inclui os métodos geoestatísticos. McBratney *et al.*, (2000) acrescentam a estas duas, uma terceira abordagem, denominada de método híbrido e que na realidade, é uma combinação de técnicas dos métodos CIORPT e geoestatístico, a fim de melhorar as predições das propriedades dos solo através de novas técnicas quantitativas (Figura 1).

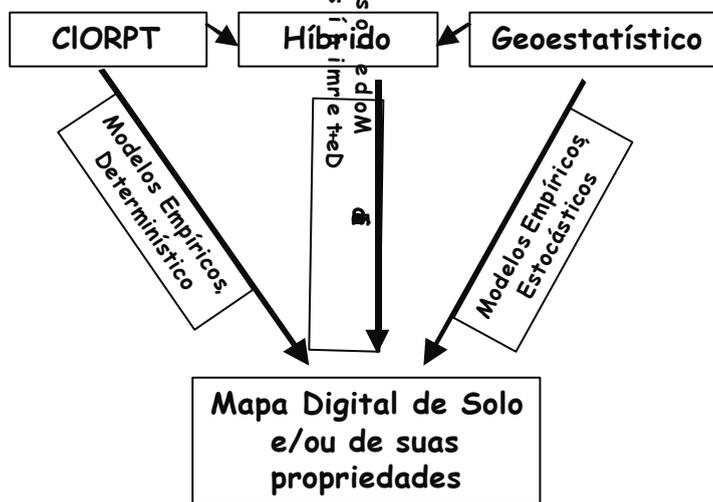


Fig. 1 – Métodos usados para Mapeamento de Solos, de acordo com Mc Bratney *et al.*, (2000).

Mapeamento tradicional de solos (método clássico)

O Levantamento Pedológico tradicional é fundamentado 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, falamos 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 uma forte correlação entre os tipos de solos e o ambiente onde eles se encontram (abordagem CIORPT). Trata-se de uma abordagem essencialmente qualitativa, de natureza empírico-determinística, realizada com base na análise da fisiografia da paisagem e da interpretação de fotografias aéreas.

O Levantamento Pedológico tradicional é baseado no modelo discreto e 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. Ele tem como base o pressuposto de que fatores de formação (CIORPT) controlam a distribuição dos diferentes solos na paisagem. É reconhecido que características e propriedades dos solos variam espacialmente e que esta variabilidade não é ao acaso e é resultante da atuação do clima e de organismos vivos sobre material de origem de natureza mineral ou orgânica ou a mistura destes, condicionada pelo relevo e pelo tempo (Soil Survey Staff, 1993).

Em universos de natureza contínua, como é o solo, indivíduos assim criados pela mente são artificiais, aos quais se impõe limites arbitrários, constituindo, portanto, segmentos de uma população de distribuição contínua, com superposições de inúmeras propriedades (Knox, 1965). São mais importantes nestas concepções muito básicas sobre levantamentos de solos os conceitos de “*pedon*” e “*polipedon*”, como unidades de transferência da concepção teórica do indivíduo

solo para o conhecimento, no campo, de unidades taxonômicas e finalmente, unidades de mapeamento (Embrapa, 1995).

Na grande maioria das vezes, os solos são os mesmos onde quer que os fatores de formação e os processos de pedogênese sejam idênticos. Em síntese, pode-se afirmar que nas mesmas condições de clima, material de origem, relevo, biota e tempo, em ambientes semelhantes, em diferentes locais, os solos são semelhantes. Este padrão regular, repetitivo de fatores de formação, processos e condicionantes, permite a inferência de muitos tipos de solos diferentes na paisagem. A combinação destes fatores de formação é mais ou menos aparente, em função da extensão da área, em nível regional ou local.

Em nível regional, os padrões de clima, vegetação, material originário, podem ser usados no prognóstico de classes de solos em áreas de grande abrangência, em níveis bastante elevados de abstração e generalização. Por outro lado, os padrões locais de topografia, material de origem, tempo e suas relações com a cobertura vegetal e com os microclimas, podem ser usados no prognóstico de classes de solos em pequenas áreas.

Com base nestes conceitos, pressupostos e, principalmente, experiência, os pedólogos aprendem a interpretar características locais de topografia e vegetação como indícios de combinações dos fatores de formação dos solos e podem inferir os limites entre classes e inferir propriedades dos solos dentro dos limites de classes, mas seu paradigma é cientificamente inadequado, porque ignora ambos, a variabilidade espacial dos fatores de formação do solo e do próprio solo resultante (Burrough & McDonnell, 1998). Além disso, sua representação espacial tem sido sempre discreta, na forma de mapas do tipo "Choropleth" (Figura 2), com limites abruptos entre as unidades de mapeamento.

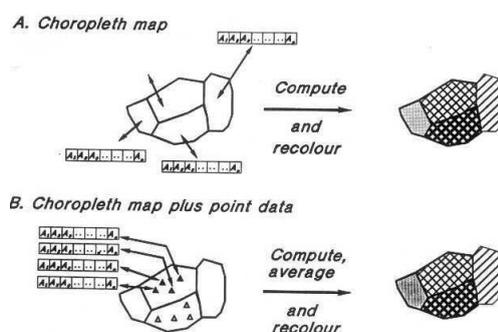


Fig. 2 - Modelo de mapa "choropleth" (A), com perfis representativos; informações numéricas referentes às unidades de mapeamento (B).

Limitações do método tradicional

Tradicionalmente, o Levantamento e a Classificação dos Solos têm sido a abordagem mais clássica para separar em grupos os diferentes tipos de solos na paisagem. Vários autores têm criticado os aspectos subjetivos desse método tradicional (Beckett & Webster, 1971; Burgess *et al.*, 1981; McBratney *et al.*, 1981a; Burgess & Webster, 1984; Burrough 1989) e discutido o fato de ser este, de caráter discreto (Baize, 1986; Aubert & Boulaine, 1989; Lark & Beckett, 1998), em oposição ao modelo contínuo, o que implica assumir que as classes de solos possuem limites abruptos. Isto significa dizer que em geral, cada unidade de mapeamento representa uma característica pedológica constante ou um determinado tipo de solo. Em síntese, a unidade de mapeamento é definida a partir de um "perfil representativo ou típico" do solo (Soil Survey Staff, 1993). 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 precisão dos valores preditos estará dessa maneira, sujeita à homogeneidade das unidades de mapeamento, ou seja, à variância interna à unidade.

Como tem sido mostrado em vários trabalhos (Burgess & Webster, 1984; McBratney & Webster, 1981; Odeh *et al.*, 1990), o método tradicional não considera a dependência espacial entre as unidades de mapeamento, a qual pode ser forte, principalmente em se tratando de levantamentos detalhados ou em áreas onde os limites entre os solos não são óbvios. Conseqüentemente, o modelo discreto, assumido no mapeamento tradicional não é geralmente realístico, porque os limites naturais na paisagem tendem a ser mais graduais que abruptos.

Mapeamento digital de solos e/ou de suas propriedades com uso de técnicas quantitativas (Pedometria)

Buscando uma solução para as incertezas inerentes ao método tradicional, novas abordagens de modelagem quantitativa dos solos têm sido propostas, a fim de descrever, classificar e estudar os padrões de variação espacial dos solos na paisagem, objetivando melhorar o conhecimento da variabilidade espacial dos solos, da precisão e da qualidade da informação, através de diversas técnicas quantitativas, chamadas no conjunto, de Pedometria ("*Pedometrics*") (Webster, 1984).

Para solucionar quantitativamente a equação de Jenny (1941), McBratney *et al.* (2000) propõem aliar em um modelo determinístico-estocástico, o conhecimento pedológico sobre os processos de formação e distribuição dos solos na paisagem (CIORPT - clima, relevo, organismos, material de origem e tempo), com técnicas quantitativas usadas em Pedometria, com a finalidade de prever com maior rapidez e precisão, e a um custo mais baixo, as classes de solos ou as propriedades destes para uma determinada região.

A Pedometria, inclui por exemplo, as técnicas de geoestatística, as quais têm sido amplamente aplicadas à ciência do solo (McBratney *et al.*, 1981; Burgess *et al.*, 1981; Voltz & Webster, 1990; De Gruijter & McBratney, 1988; Voltz *et al.*, 1997).

A **geoestatística** tem suas bases na teoria de variáveis regionalizadas (Matheron, 1965), a qual considera a variabilidade espacial das propriedades dos solos como realizações de uma função aleatória, a qual pode ser representada por um modelo estocástico. Desde o início dos anos 80, (Burgess & Webster, 1980) aplicaram o método geoestatístico denominado krigagem ("*kriging*") para a interpolação espacial dos solos. Com relação aos solos, a aplicação de técnicas de geoestatística univariada não é muito apropriada, em se tratando de ambientes mais complexos, onde os processos de formação dos solos se combinam de maneira também complexa. Novos trabalhos empregando estatística multivariada para estudar a correlação espacial entre as diversas propriedades dos solos estão sendo realizados, entre eles, pode-se citar o trabalho de Castrignano *et al.*, (2000).

Uma outra técnica quantitativa utilizada em pedometria para lidar de uma maneira quantitativa com a imprecisão, é a **lógica e os conjuntos nebulosos** (“fuzzy”). Essa técnica, introduzida por Zadeh, (1965), permite trabalhar com classes indefinidas e com limites indeterminados, ou seja, conceitos não exatos. Os conjuntos fuzzy foram primeiramente aplicados às análises de grupamentos (“cluster analysis”), por Ruspini, (1969). Em seguida, os conjuntos fuzzy foram desenvolvidos como “fuzzy-c-means” por Bezdek, (1974) e Dunn, (1974), posteriormente chamados “fuzzy-k-means” por De Gruijter & McBratney, (1988), para criar classes contínuas, bem mais flexíveis que o método tradicional, permitindo que um mesmo indivíduo pertença, em diferentes proporções a diferentes classes. Essa técnica permite passar-se da lógica Booleana (verdadeiro ou falso), onde um indivíduo pertence ou não pertence a uma determinada classe, para um conceito mais amplo onde um indivíduo pode pertencer totalmente, parcialmente ou não pertencer a uma determinada classe, sendo que o grau de pertinência pode assim, variar entre 0 e 1. Esses conceitos e técnicas têm sido aplicados em várias áreas do conhecimento, tais como geologia, climatologia e ciência do solo, entre outras.

Especificamente na área de ciência do solo, as técnicas de geoestatística precisam ser associadas às técnicas de classificação fuzzy; a classificação fuzzy permite a alocação de indivíduos, como por exemplo, os *pedons*, em função de seu grau de pertinência à cada classe de solo mapeada. O grau de pertinência é determinado à partir do desvio dos atributos de cada indivíduo com relação às classes centróides (McBratney & De Gruijter, 1992). As classes de solos obtidas através dessas técnicas são contínuas, ou seja, com limites geográficos fuzzy ou com transições graduais entre elas.

Algumas técnicas de Inteligência Artificial como árvores de decisão e redes neurais também vêm sendo utilizadas em Ciência do Solo. As **árvores de decisão** podem ser usadas quando se tem que estudar interações complexas entre os atributos, cujo objetivo é produzir um sistema que seja capaz de identificar padrões e reconhecê-los em análises futuras (Quinlan, 1986). Uma solução para esse tipo de situação, é a construção de uma estrutura hierárquica de regras chamada de “decision/classification trees” (Figura 3). As árvores de decisão/classificação podem ser pensadas como um tipo de chave taxonômica múltipla automatizada. A classificação se executa em respondendo uma série de questões sobre os atributos observados.

A figura 3 ilustra as funções de pedotransferência obtidas por árvore de decisão, a partir de um conjunto de dados de solos do sul do Estado do Amazonas, para estimar a microporosidade do solo, utilizando-se nesse caso, a granulometria e o teor de carbono orgânico.

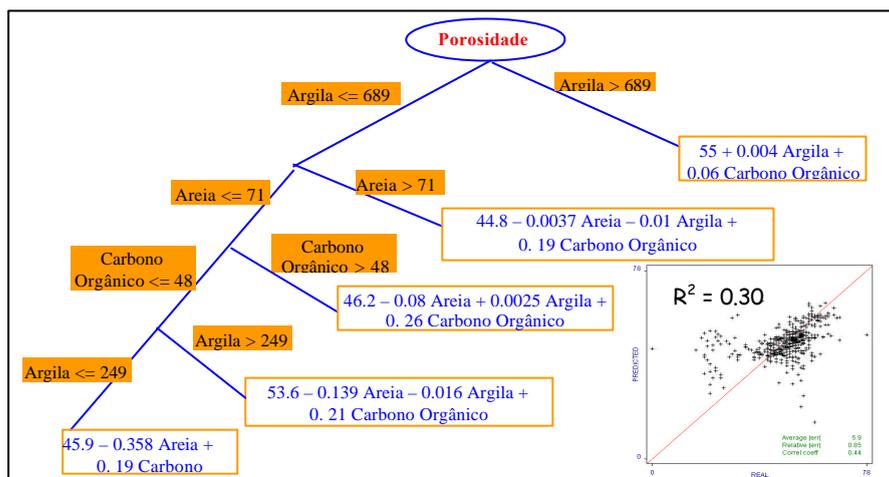


Fig. 3 – Modelo de árvore de decisão, onde tem-se a predição da microporosidade do solo (%) a partir de dados de granulometria e teor de carbono orgânico dos solos.

Essa figura ilustra assim, o potencial das PTFs para se colocar em relevo os dados existentes em trabalhos de levantamentos tradicionais, extraíndo deles muito além das informações inicialmente previstas, principalmente informações de difícil determinação e/ou custos elevados. Observa-se que apesar dos baixos valores de R^2 , as PTFs estimadas podem ser úteis quando não se tem dados sobre a propriedade do solo que se deseja estudar e, desde que aplicadas para as mesmas condições regionais. Vale ressaltar que os valores de R^2 podem ser bastante melhorados quando se inclui como preditoras mais variáveis com melhores correlações com a propriedade que se pretende estimar. Essa melhoria da capacidade preditora das PTFs está evidentemente na dependência da disponibilidade de dados dessas outras propriedades auxiliares. Caso essas propriedades tenham que ser determinadas, deve-se antes analisar o custo que isso implica e o que elas representam em termos de precisão (em função dos objetivos almejados), para que não se perca a eficiência da predição. Uma outra maneira de melhorar as estimativas das PTFs, é construí-las para dados mais específicos, como para uma determinada classe de solo ou classe textural.

Uma outra possível aplicação das PTFs seria o uso dessa ferramenta para a melhor definir os limites quantitativos das características diagnósticas para fins de evolução de Sistemas de Classificação do Solo, o que certamente estaria na dependência da construção de uma Base de Dados dos solos sólida e representativa de todas as ocorrências.

As **redes neurais** constituem modelos matemáticos capazes de imitar ou de trabalhar de forma similar ao cérebro humano. A rede é constituída de vários “neurons” que são conectados por canais de comunicação (“connectors”). Esses conectores contém os dados numéricos, os quais são arranjados de diferentes maneiras e organizados em camadas. Os dados podem receber pesos diferentes e não existe uma estrutura assumida para o modelo. As redes são de fato, ajustadas ou “treinadas” para responder a uma determinada demanda (Figura 4).

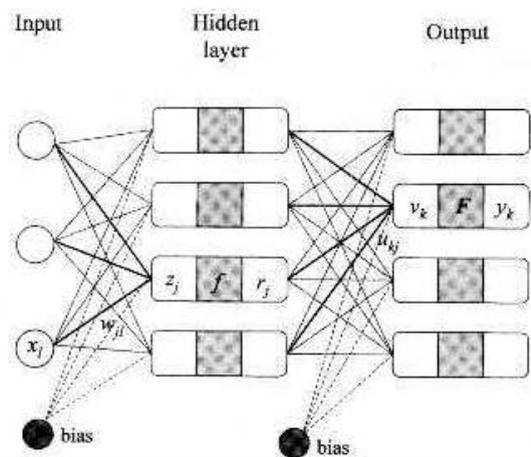


Fig. 4 - Estrutura de uma rede neural (Gershenfeld, 1999), mostrando a camada de entrada de dados (*input*), uma camada onde se processam as informações (*hidden layer*) e uma camada de informação que corresponde à resposta dada à demanda para qual a “rede” foi treinada (*output*).

Conclusão

Este documento, cujo objetivo é o de traçar um panorama geral sobre os métodos de mapeamento de solos e/ou de suas propriedades, assim como sobre as principais técnicas quantitativas usadas, nos leva a concluir pelo exposto, a necessidade de se adotar um modelo híbrido (McBratney *et al.*, 2000), ou seja, determinístico - estocástico, combinando os dois métodos através da derivação da correlação não linear entre os fatores ambientais exógenos que influenciam os processos multivariados de formação do solo, descritos por (Jenny, 1941) e chamado de método **CIORPT**, ou seja, o solo $S = f(\text{Clima, Organismos, Relevô, material Parental e Tempo})$, com métodos geoestatísticos, também multivariados, usados para a interpolação espacial dos valores preditos ou de seus resíduos (Odeh *et al.*, 1995). A aplicação de cada técnica no âmbito do método híbrido, dependerá dos objetivos, da resolução espacial desejada e da qualidade da informação requerida. Cada técnica produzirá um erro diferente e portanto, deve-se estar consciente sobre as particularidades e limitações de cada uma delas.

Referências Bibliográficas

AUBERT, G.; BOULAIN, J. Contributions de certains pédologues français à l'évolution des concepts pédologiques utilisés en cartographie. **Science du Sol**, Versailles, v. 27, p. 395-411, 1989.

BAIZE, D. Couvertures pédologiques, cartographie et taxonomie. **Science du Sol**, Versailles, v. 24, p. 227-243, 1986.

BECKETT, P. H. T.; WEBSTER, R. Soil variability: a review. **Soils and Fertilizers**, Wallingford, v. 34, p. 1-15, 1971.

BEZDEK, J. C. Numerical taxonomy with fuzzy sets. **Journal of Mathematical Biology**, New York, v. 1, p. 57-71, 1974.

BURGESS, T. M.; WEBSTER, R. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties, I. The semivariogram and punctual kriging. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 31, p. 315-331, 1980.

BURGESS, T. M.; WEBSTER, R. Optimal sampling strategies for mapping soil types, I. Distribution of boundary spacings. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 35, p. 641-654, 1984.

BURGESS, T. M.; WEBSTER, R.; McBRATNEY, A. B. Optimal interpolation and isarithmic mapping, IV. Sampling strategies. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 32, p. 643-659, 1981.

BURROUGH, P. A. Fuzzy mathematical methods for soil survey and land evaluation. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 40, p. 477-482, 1989.

BURROUGH, P.A.; McDONNELL, R.A. **Principles of Geographical Information Systems**. Oxford University Press; Oxford. 1998. 333 p.

CASTRIGNANO, A.; GIUGLIARINI, L.; RISALITI, R.; MARTINELLI, N. Study of spatial relationships among some soil physico-chemical properties of a field in central Italy using multivariate geostatistics. **Geoderma**, Amsterdam, v. 97, p. 39-60, 2000.

CLINE, M. G. Basic principles of soil classification. **Soil Science**, Baltimore, v. 67, p. 81-91, 1949.

DE GRUIJTER, J. J.; McBRATNEY, A. B. A modified fuzzy k-means method for predictive classification. In: BOCK, H. H. (Ed.). **Classification and related methods of data analysis**. Elsevier: Amsterdam, 1988. p. 97-104.

DUNN, J. C. A fuzzy relative of the isodata process and its use in detecting compact, well-separated clusters. **Journal Cyber**, [s.l.], v. 3, p. 22-57, 1974.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Procedimentos normativos de levantamentos pedológicos**. Embrapa - SPI. 1995. 116 p.

GERSHENFELD, N. **The nature of mathematical modelling**. Cambridge University: Cambridge, 1999. 1 v.

JENNY, H. **Factors of soil formation, a system of quantitative pedology**. McGraw-Hill: New York, 1941. 281 p..

KNOX, E. G. Soil individuals and soil classification. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 29, p. 79-84, 1965.

LARK, R. M.; BECKETT, P. H. T. A Geostatistical descriptor of the spatial distribution of soil classes, and its use in predicting the purity of possible soil map units. **Geoderma**, Amsterdam, vol. 83, n. 3-4, p. 243-267, 1998.

MATHERON, G. **Les variables regionalisées et leur estimation**. Masson, Paris. 1965. 1 v.

McBRATNEY, A. B.; DE GRUIJTER, J. J. A continuum approach to soil classification by modified fuzzy k-means with extragrades. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 43, n. 1, p. 159-175, 1992.

McBRATNEY, A. B.; ODEH, I. O. A.; BISHOP, T. F. A.; DUNBAR, M. S.; SHATAR, T. M. An overview of pedometric techniques for use in soil survey. **Geoderma**, Amsterdam, v. 97, n. 3-4, p. 293-327, 2000.

McBRATNEY, A. B.; WEBSTER, R. Spatial dependence and classification of soil along a transect in northeast Scotland. **Geoderma**, Amsterdam, v. 26, p. 63-82, 1981.

McBRATNEY, A. B.; WEBSTER, R.; BURGESS, T. M. The design of optimal schemes for local estimation and mapping of regionalized variables, I. Theory and Methods. **Computers & Geosciences**, Oxford, v. 7, p. 331-334, 1981.

ODEH, I. O. A.; McBRATNEY, A. B.; CHITTLEBOROUGH, D. J. Design of optimal sample spacings for mapping soil using fuzzy-k-means and regionalized variable theory. **Geoderma**, Amsterdam, v. 47, p. 93-122, 1990.

ODEH, I. O. A.; McBRATNEY, A. B.; CHITTLEBOROUGH, D. J. Further results on prediction of soil properties from terrain attributes: heterotopic cokriging and regression-kriging. **Geoderma**, Amsterdam, v. 67, p. 215-225, 1995.

QUINLAN, J. R. Induction of decision trees. **Machine Learning**, Boston, v. 1, p 81-106, 1986.

RUSPINI, E. H. A new approach to clustering. **Information and Control**, New York, v. 15, p. 22-32, 1969.

SOIL SURVEY DIVISION STAFF (Washington, D.C.) **Soil survey manual**. Washington, D.C.: USDA, 1993. 437p. (USDA. Agriculture Handbook, 18).

VOLTZ, M., LAGACHERIE, P. AND LOUCHART, X. Predicting soil properties over a region using sample information from a mapped reference area. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 48, p. 19-30, 1997.

VOLTZ, M.; WEBSTER, R. A comparison of kriging, cubic splines and classification for predicting soil properties from sample information. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 41, p. 473-490, 1990.

WEBSTER, R. Quantitative spatial analysis of soil in the field. **Advances in Soil Science**, New York, v. 3, p. 1-70, 1984.

ZADEH, L. A. Fuzzy sets. **Information and Control**, New York, n. 8, p. 338-353, 1965.