

ISSN 1517-5111  
ISSN online 2176-5081  
Março, 2013

*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária  
Embrapa Cerrados  
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento*

## ***Documentos 316***

### **Mapeamento de Solos do Tradicional ao Digital**

*Larissa Ane de Sousa Lima  
Marina Rolim Bilich Neumann  
Adriana Reatto  
Henrique Llacer Roig*

Embrapa Cerrados  
Planaltina, DF  
2013

Exemplar desta publicação disponível gratuitamente no link:  
[http://bbeletronica.cpac.embrapa.br/versaomodelo/html/2013/doc/doc\\_316.shtml](http://bbeletronica.cpac.embrapa.br/versaomodelo/html/2013/doc/doc_316.shtml)

#### **Embrapa Cerrados**

BR 020, Km 18, Rod. Brasília/Fortaleza  
Caixa Postal 08223, CEP 73310-970 Planaltina, DF  
Fone: (61) 3388-9898, Fax: (61) 3388-9879  
<http://www.cpac.embrapa.br>  
[sac@cpac.embrapa.br](mailto:sac@cpac.embrapa.br)

#### **Comitê de Publicações da Unidade**

Presidente: *Claudio Takao Karia*  
Secretária-Executiva: *Marina de Fátima Vilela*  
Secretárias: *Maria Edilva Nogueira*  
*Alessandra Gelape Faleiro*

Supervisão editorial: *Jussara Flores de Oliveira Arbués*

Equipe de revisão: *Francisca Eljani do Nascimento*  
*Jussara Flores de Oliveira Arbués*

Normalização bibliográfica: *Marilaine Schaun Pelufe*  
*Fábio Lima Cordeiro*

Editoração eletrônica: *Renato Berlim Fonseca*

Capa: *Renato Berlim Fonseca*

Foto(s) da capa:

Impressão e acabamento: *Divino Batista de Sousa*  
*Alexandre Moreira Veloso*

#### **1ª edição**

1ª impressão (2013): tiragem 100 exemplares  
Edição online (2013)

#### **Todos os direitos reservados**

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

#### **Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)** **Embrapa Cerrados**

---

M386 Mapeamento de Solos: do tradicional ao digital / Larissa Ane de Sousa  
Lima et al. – Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2013.

52 p. – (Documentos / Embrapa Cerrados, ISSN 1517-5111,  
ISSN online 2176-5081,316).

1. Pedologia. 2. Reconhecimento do solo. 3. Método estatístico.  
4. Método quantitativo. 5. Pedometria. Mapa Digital de Solo. 6. Brasil.  
I. Lima, Larissa Ane de. II. Neumann, Marina Rolim Bilich. III. Reatto,  
Adriana. IV. Roig, Henrique Llacer. V. Série.

631.4 CDD 21

---

© Embrapa 2013

## **Autores**

### **Larissa Ane de Sousa Lima**

Geógrafa, mestranda no Instituto de  
Geociências - UnB

Campus Universitário Darcy Ribeiro, ICC, Ala Sul  
70910-70 - Brasília, DF

Estagiária da Embrapa Cerrados e bolsista da Capes  
larissa.ane.sl@gmail.com

### **Marina Rolim Bilich Neumann**

Engenheira-agrônoma, D.Sc. em Geociências

Professora da Faculdade de Agronomia e Medicina  
Veterinária - UnB

marinabilich@unb.br

### **Adriana Reatto**

Engenheira-agrônoma, Ph.D. em Ciência do Solo

Pesquisadora da Embrapa Cerrados

adriana.reatto@embrapa.br

### **Henrique Llacer Roig**

Geólogo, D.Sc. em Geologia

Professor do Instituto de Geociências

unbroig@unb.br

# Soil Mapping: from traditional to digital

---

## Abstract

*The traditional soil mapping has been the recipient of critics due to its qualitative and laborious character. As a response to such critics, quantitative studies have been conducted in the soil science area known as Pedometrics. It consists of the application of mathematical and statistical methods for soil modeling and its aspects, enabling the prediction and specialization of classes and attributes of soils on the landscape. Currently, in most of works, pedometric techniques are employed for soil spatial variability description via the concoction of Soil Digital Maps (SDP). Many initiatives have been taken in order to spread and widen SDP application in Brazil, and an increasing amount of works has been conducted. Once it is consolidated, SDP application will no longer be experimental, but practical, turning it into a robust tool and enabling it to fulfill the demand for pedological data. Thus, the main goal of this document was to guide a theoretical review on the major methods of soil mapping and contextualize them with the Brazilian reality.*

*Index terms: Pedometrics; soil analysis; quantitative methods; pedology; soil science.*

# Apresentação

Existe uma escassez e, conseqüentemente, uma demanda por mapeamentos de solos em todo território nacional nas mais variadas escalas de mapeamento, as quais são imprescindíveis para o planejamento e gestão territorial. O mapeamento tradicional do solo vem sendo criticado ao longo do tempo por seu caráter qualitativo, oneroso e demorado. Em contraparte, o mapeamento digital de solos (MDS) surge como um grande aliado. O MDS permite acelerar e melhorar o conhecimento de solos por meio da aplicação de métodos matemáticos e estatísticos para a modelagem do solo e seus aspectos, possibilitando, desse modo, a predição e a espacialização de classes e atributos de solos na paisagem. Em face ao grande desafio de produzir informação sobre a distribuição espacial de classes e atributos de solos para todo o território brasileiro, este documento apresenta uma revisão teórica sobre os principais métodos utilizados para o mapeamento de solos do tradicional ao digital e uma contextualização com a realidade brasileira.

*José Roberto Rodrigues Peres*  
Chefe-Geral Embrapa Cerrados

ZHU, A. X. Mapping soil landscape as spatial continua: the neural network approach. **Water Resources Research**, v. 36, p. 663-677, 2000.

ZHU, A. X.; HUDSON, B.; BURT J. E.; LUBICH, K.; SIMONSON, D. Soil mapping using GIS, expert knowledge, and *fuzzy* logic. **Soil Science Society of America Journal**, v. 65, p. 1463-1472, 2001.

ZHU, A. X.; QI, F.; MOORE, A.; BURT, E. J. Prediction of soil properties using *fuzzy* membership values. **Geoderma**, Amsterdam, v. 158, p. 199-206, 2010b.

ZHU, A. X.; YANG, L.; LI B.; QIN, C.; PEI, T.; LIU, B. Construction of membership functions for predictive soil mapping under *fuzzy* logic. **Geoderma**, Amsterdam, v. 155, p. 164-174, 2010a.

ROWELL, D. L. **Soil science: methods and applications**. Essex: Addison Wesley Longman, 1994. 350 p.

SANCHEZ, P. A.; AHAMED, S.; CARRE, F.; HARTEMINK, A. E.; HEMPEL, J.; HUISING, J.; LAGACHERIE, P.; MCBRATNEY, A. B.; MCKENZIE, N. J.; MENDONCA-SANTOS, M. D.; MINASNY, B.; MONTANARELLA, L.; OKOTH, P.; PALM, C. A.; SACHS, J. D.; SHEPHERD, K. D.; VAGEN, T. G.; VANLAUWE, B.; WALSH, M. G.; WINOWIECKI, L. A.; ZHANG, G. L. Digital soil map of the world. **Science**, v. 325, p. 680-681, 2009.

SCULL, P.; FRANKLIN, J.; CHADWICK, O. A.; MCARTHUR, D. Predictive soil mapping: a review. **Progress in Physical Geography**, v. 27, p. 171-197, 2003.

SILVEIRA, C. T. **Análise digital do relevo na predição de unidades preliminares de mapeamentos de solos: integração de atributos topográficos em sistemas de informações geográficas e redes neurais artificiais**. 2010. 154 f. Tese (Doutorado)- Universidade Federal do Paraná, 2010.

SIRTOLI, A. E.; SILVEIRA, C. T.; MANTOVANI, L. E.; SIRTOLI, A. R. A.; OKA-FIORI, C. Atributos do relevo derivados de modelo digital de elevação e suas relações com solos. **Scientia Agraria**, Curitiba, v. 9, n. 3, p. 317-329, 2008.

SKIDMORE, A. K.; TURNER, B. J.; BRINKHOF, W.; KNOWLES E. Performance of a neural network: mapping forest using GIS and remotely sensed data. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 63, p. 501-514, 1997.

THOMPSON, A. L.; GHIDEY, F.; REDMI, T. P. Raindrop energy effects on chemical and sediment transport. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 44, n. 4, p. 835-841, 2001.

TURETTA, A. P. D.; PRADO, R. B.; SCHULER, A. E. Serviços ambientais no Brasil: do conceito à prática. In: PRADO R. B.; TURETTA A. P. D.; ANDRADE A. G.(Org.). **Manejo e conservação do solo e da água no contexto das mudanças ambientais**. Rio de Janeiro: Embrapa, 2010. p. 239-253.

VELDKAMP, A.; KOK, K.; KONING, G. H. J.; SCHOORL, J. M.; SONNEVELD, M. P. W.; VERBURG, P. H. Multi-scale approaches in agronomic research at landscape level. **Soil & Tillage Research**, v. 58, p. 129-140, 2001.

VILELA, M. F. **Integração de técnicas de geoprocessamento e levantamento participativo de informações socioambientais: um subsídio à reforma agrária**. 2002. 135 f. Tese (Doutorado)- Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2002.

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

ZHU, A. X. A similarity model for representing soil spatial information. **Geoderma**, Amsterdam, v. 77, p. 217-242, 1997.

## Sumário

Introdução.....	7
Mapeamento de Solos.....	10
Abordagem Tradicional de Levantamento de Solos .....	10
Pedometria .....	13
Mapeamento Digital do Solo (MDS) .....	18
Considerações Finais e Tendências Futuras para o Mapeamento Digital do Solo .....	37
Referências .....	41
Abstract.....	51

MINASNY, B.; MCBRATNEY, A.B.; CARRÉ, F. **Encyclopedia of Soil Science**. Flórida: CRC Press, 2008. 902 p.

MOORE, I. D.; TURNER, A. K.; WILSON, J. P.; JENSON, S. K.; BAND, L. E. GIS and land-surface subsurface process modeling. In: GOODCHILD, M. F.; PARKS, B. O.; STEYAERT, L. T. (Ed.). **Environmental Modeling with GIS**. New York: Oxford, 1993. p. 196-230.

MOREIRA SILVA, A. **Integração de dados geológicos e geofísicos utilizando-se de uma nova técnica estatística para seleção de alvos para exploração mineral, aplicada ao Greenstone Belt Rio das Velhas, Quadrilátero Ferrífero**. 1999. 195 f. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências – IG, Universidade de Brasília, Brasília.

MOREIRA, F. R. S.; ALMEIDA FILHO, R. A.; CÂMARA G. Modelamento de dados geológicos em pesquisa mineral segundo o teorema de Bayes. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, Belo Horizonte, 2003. **Anais**. p. 895-902.

NEUMANN, M. R. B. Mapeamento digital de solos no Distrito Federal. 2012. 124 f. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências – IG, Universidade de Brasília, Brasília.

NEUMANN, M. R. B.; ROIG, H. L.; LACERDA, M. P. C.; ROLIM, L. R.; BOECHAT, C.; BORGES, T. D.; ARAÚJO, P. C.; SOUSA, R. Q.; CAMPOS, M. P.; SILVA, R. A. B. Aplicação de técnicas de regressão no mapeamento digital de solos da bacia do ribeirão do Gama, Distrito Federal. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, Curitiba, 2011. **Anais**. p. 9219-9225.

ODEH, I. O. A.; MCBRATNEY, A. B. Using AVHRR images for spatial prediction of clay content in the lower Namoi valley of eastern Australia. **Geoderma**, Amsterdam, v. 97, p. 237-254, 2000.

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

ODEH; I. O. A.; CHITTLEBOROUGH, D. J.; MCBRATNEY, A. B. Elucidation of soil landform interrelationships by canonical ordination analysis. **Geoderma**, Amsterdam, v. 49, p. 1-32, 1991.

PALM, C. A.; SANCHEZ P. A.; AHAMED S.; AWITI A.; ANNU A. Soils: A Contemporary Perspective. **Annual Review of Environment and Resources**. v. 32, p. 99-129, 2007.

RANZANI, G. **Manual de Levantamento de Solos**. São Paulo: Edgar Blucher, 1969. 167 p.

ROJAS, E. H. M. **Síntese Genética de Redes Neurais Artificiais ART2 na Classificação de Imagens ASTER para Mapeamento de Uso e Cobertura da Terra na Região Norte do Mato Grosso**. 2004. 124 f. Dissertação (Mestrado) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2004.

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, v. 83, n. 3, p. 243-267, 1998.

LEE, W.; BOHRA, N. C.; ALTSCHAEFFL, A. G.; WHITE, T. D. Resilient modulus of cohesive soils. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 123, n. 2, p. 131-136, 1998.

LILLESAND, T. M.; KIEFER R. W. **Remote sensing and image interpretation**. Chichester: John Wiley & Sons, 1994. 750 p.

LÓPEZ, L. R. **Pedologia Quantitativa**: espectrometria VIS-NIR-SWIR e mapeamento digital de solos. 2009. 171 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo.

MAPA. 2013. **Zoneamento de risco climático**. Política agrícola do Ministério da Agricultura e Pecuária, Brasil. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/politica-agricola/zoneamento-agricola>>. Acesso em: 28 abril 2013.

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.; MENDONÇA SANTOS, M. L.; MINASNY, B. On digital soil mapping. **Geoderma**, Amsterdam, v. 117, p. 3-52, 2003.

MCBRATNEY, A. B.; ODEH, I. O. A. Application of *fuzzy* sets in soil science: *fuzzy* logic, *fuzzy* measurements and *fuzzy* decisions. **Geoderma**, Amsterdam, v. 77, p. 85-113, 1997.

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, p. 293-327, 2000.

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

MEA - MILLENNIUM ECOSYSTEMS ASSESSMENT. 2005. **Ecosystems and Human Well-Being**. Washington, DC: Island Press, 2005. 120 p.

MENDONÇA-SANTOS, M. L.; SANTOS, H. G. 2003. **Mapeamento digital de classes e atributos de solos**: métodos, paradigmas e novas técnicas. Rio de Janeiro: Embrapa, 2003. (Documentos, 55). 19 p.

MENDONÇA-SANTOS, M. L.; SANTOS, H. G. dos. The state of the art of brazilian soil mapping and prospects for digital soil mapping. In: LAGACHERIE, P. **Digital soil mapping**: an introductory perspective. Amsterdam: Elsevier, 2007. p. 39-54.

## Mapeamento de Solos: do tradicional ao digital

*Larissa Ane de Sousa Lima*

*Marina Bilich Rolim Neumann*

*Adriana Reatto*

*Henrique Llacer Roig*

### Introdução

Devido à crescente necessidade de um planejamento adequado e sustentável das atividades humanas, o entendimento dos ecossistemas e, principalmente, da prestação de serviços ambientais por esses ambientes tornou-se imperativo (SANCHEZ et al., 2009). São exemplos práticos dessas necessidades: o zoneamento agrícola de risco climático (MAPA, 2013), que tem por finalidade planejar os riscos climáticos, direcionando o crédito e o seguro à produção na agricultura; e o Zoneamento Ecológico-Econômico, que busca o planejamento e o ordenamento territorial como uma proposta integradora para o uso do território.

Para efetivar esses zoneamentos, há necessidade de mapas de solos em escalas adequadas, mais precisos e com o maior número de informações possíveis (FAO, 1998; MEA, 2005; PALM et al., 2007). A disponibilização desses mapas é escassa e, quando disponível, encontra-se em escala e (ou) resolução não adequadas (SANCHEZ et al., 2009).

Diversas são as limitações para a obtenção de informações de solos e seus atributos químicos, físicos e biológicos, por exemplo: o custo

elevado dos levantamentos; a grande extensão das áreas a serem mapeadas; e, por vezes, a dificuldade de acesso a determinadas regiões (LAGACHERIE et al., 2007; MINASNY et al., 2008; SANCHEZ et al., 2009; NEUMANN, 2012).

Além disso, os métodos de levantamento de solos tradicionais são demorados e não apresentam adequadamente as informações demandadas pelos diferentes usuários. Ainda, em razão da utilização dos métodos empíricos na metodologia clássica do mapeamento, há problemas de precisão da informação, confiabilidade das interpretações qualitativas e dificuldade de extrapolação da informação obtida para outras áreas (McBRATNEY; WEBSTER, 1981; BURGESS; WEBSTER, 1984; ODEH et al., 1990; ZHU, 1997; ZHU et al., 2000; MENDONÇA-SANTOS; SANTOS, 2003; NEUMANN, 2012). Entretanto, os levantamentos tradicionais são ainda a principal fonte de informações sobre o solo no Brasil.

Por esses motivos, o mapeamento convencional de solo vem sendo criticado ao longo do tempo (McBRATNEY WEBSTER, 1981; MINASNY et al., 2008; SANCHEZ et al., 2009). Em resposta a essas críticas, nos últimos anos, abordagens quantitativas vêm sendo desenvolvidas, objetivando melhorar a precisão e a qualidade do mapeamento do solo e seus atributos (McBRATNEY et al., 2000, 2003; MENDONÇA-SANTOS; SANTOS, 2003; LAGACHERIE et al., 2007).

Esses estudos quantitativos em solos têm sido desenvolvidos na área da ciência do solo denominada Pedometria. A pedometria é uma ciência baseada em modelos numéricos ou estatísticos para inferir as variações espaciais e temporais de classes e propriedades do solo a partir de observações, conhecimento e dados de covariáveis ambientais relacionados (McBRATNEY et al., 2000).

O uso de técnicas quantitativas para predição da distribuição espacial dos solos e de seus atributos na paisagem vem crescendo nestes últimos anos, devido ao avanço na capacidade de processamento dos computadores; ao surgimento de novos métodos matemáticos e

GONG, P.; HOWARD, P. J. The use of structural information for improving land-cover classification accuracies at the rural-urban fringe. **Photogrammetric Engineering and Remote sensing**, v. 60, p. 331-337, 1990.

Hansen; D. T. **Describing GIS applications: spatial statistics and weight evidence extension to ArcView in the analysis of the distribution archaeology sites in Landscape**. 2001. Disponível em: <<http://www.giscafe.com/TechPapers/Papers/paper054/>>. Acesso em: 11 de julho 2009.

HARTEMINK, A. E.; McBRATNEY, A.; MENDONÇA-SANTOS, M. D. L. (Ed.). **Digital Soil Mapping with Limited Data**. Wageningen: Springer, 2008. 445 p.

HENGL, T. **Pedometric mapping: bringing the gaps between conventional and pedometric approaches**. Enschede: International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation (ITC), 2003. 214 p.

HENGL, T.; ROSSITER, D. G.; HUSNJAK, S. Mapping soil properties from an existing national soil data set using freely available ancillary data. In: WORLD CONGRESS OF SOIL SCIENCE, 17., 2002, Bangkok. **Anais**. p. 14-21.

HOSMER, D. W.; LEMESHOW, S. **Applied logistic regression**. New York: Wiley, 1989. 392 p.

HUDSON, B. D. The soil survey as paradigm-based science. **Soil Science Society of America Journal**, v. 56, p. 836-841, 1992.

IBGE. 2007. **Manual técnico de pedologia**. Disponível em: <[ftp://geoftp.ibge.gov.br/documentos/recursos\\_naturais/manuais\\_tecnicos/manual\\_tecnico\\_pedologia.pdf](ftp://geoftp.ibge.gov.br/documentos/recursos_naturais/manuais_tecnicos/manual_tecnico_pedologia.pdf)>. Acesso em: out. 2012.

INGARGIOLA, G. 1996. **Building Classification Models: ID3 and C4.5**. Disponível em: <<http://www.cis.temple.edu/~ingargio/cis587/readings/id3-c45.html>>. Acesso em: 15 ago. 2011.

JENNY, H. **Factors of soil formation**. New York: McGraw-Hill, 1941.

KATINSKY, M. **Fuzzy set modelling in Geographical Information Systems**. 1994. 43 f. Dissertação (Mestrado) – University of Wisconsin. Madison, Wisconsin, USA, 1994.

KEY, J.; MASLANIK, J. A.; SCHWEIGER, A. J. Classification of merged AVHRR and SMMR artice data with neural networks. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 55, p. 1331-1338, 1989.

LAGACHERIE, P. Digital Soil Mapping: a state of the art. In: HARTEMINK, A. E.; McBRATNEY, A. B.; MENDONÇA-SANTOS, M. L. (Ed.). **Digital Soil Mapping with Limited Data**. Wageningen: Springer, 2008. p. 3-14.

LAGACHERIE, P.; McBRATNEY, A. B.; VOLZ, A. (Ed.). **Digital Soil Mapping: an introductory perspective**. Amsterdam: Elsevier, 2007. 596 p.

(Mestrado) - Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

CRIVELENTI, R. C.; COELHO, R. M.; ADAMI, S. F.; OLIVEIRA, S. R. M. Mineração de dados aplicada ao mapeamento digital de solos: folha Dois Córregos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 32., 2009, Fortaleza. *Anais...* Fortaleza: SBSC: UFC, 2009. 1 CD-ROM.

DEBELLA-GILO, M.; ETZELMULLER, B.; KLAKEGG, O. Digital Soil Mapping Using Digital Terrain Analysis and Statistical Modeling Integrated into GIS: Examples from Vestfold County, Norway. *Catena*, v. 77, p. 8-18, 2007.

DODBOS, E.; MICHELI, E.; BAUMGARDNER, M. F.; BIEHL, L.; HELT, T. Use of combined digital elevation model and satellite radiometric data for regional mapping. *Geoderma*, Amsterdam, v. 97, p. 367-391, 2000.

DOKUCHAEV, V. V. **Russian chernozem**: complete set of works. Moscow: Academy of Sciences Publisher, 1949. p. 404. v. 3

EMBRAPA. **Mapa de solos do Brasil**. Disponível em: < <http://www.cnps.embrapa.br/>>. Acesso em: jan. 2013.

EMBRAPA. **Mapeamento digital de solos se organiza no Brasil**. Disponível em: < [http://www.cnps.embrapa.br/noticias/banco\\_noticias/20111130.html](http://www.cnps.embrapa.br/noticias/banco_noticias/20111130.html)>. Acesso em: jan. 2013.

EMBRAPA. **Procedimentos normativos de levantamentos pedológicos**. Rio de Janeiro: Embrapa, 1995. 101p.

FAO. **Soil map of the world**: revised legend (with corrections and updates). Rome: FAO/Unesco/ISRIC, 1988. 119 p. (World Soil Resources Report, 60).

FARIAS, M. F. **Integração de parâmetros morfométricos e interpretação de imagens orbitais para o auxílio no mapeamento de solos no parque nacional de Brasília**. 2008. 150 f. Dissertação (Mestrado)- Departamento de Geografia, Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

FIGUEIREDO, S. R. **Mapeamento supervisionado de solos através do uso de regressões logísticas múltiplas e sistema de informações geográficas**. 2006. 93 f. Dissertação (Mestrado)- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

FLORINSKY, I. V.; EILERS, R. G.; MANNING, G.; FULLER, L. G. Prediction of soil properties by digital terrain modeling. *Environmental Modeling Software*, v. 17, p. 295-311, 2002.

FUKS, S. D. Novos modelos para mapas derivados de informações de solos. In: ASSAD, E. D.; SANO, E. E. (Ed.). **Sistemas de informações geográficas**: aplicações na agricultura. Brasília, DF: Embrapa, 1998. 434 p.

estatísticos; e à disponibilidade crescente de dados, como imagens de sensoriamento remoto e os atributos do terreno derivados de modelos digitais de elevação (McBRATNEY et al., 2000; LAGACHERIE et al., 2007; MINASNY et al., 2008; SANCHEZ et al., 2009).

A necessidade de acelerar o processo de mapeamento, melhorando a qualidade, eliminando a subjetividade e minimizando os custos, torna fundamental a busca por novos métodos. Nesse contexto, a Pedometria e o Mapeamento Digital de Solos (MDS) apresentam um grande potencial, podendo tornar-se ferramentas capazes de vir a suprir a falta de informação pedológica. Nesse sentido, o objetivo da Pedometria não é substituir o trabalho do pedólogo no levantamento de solos, mas oferecer ferramentas quantitativas para medir o significado das informações pedológicas e facilitar os levantamentos.

No caso do Brasil, país com dimensões continentais, o conhecimento sobre os solos ainda é muito baixo. As principais informações cartográficas disponíveis são o mapa de solos do Brasil em escala de 1:5.000.000 (EMBRAPA, 2011); as cartas pedológicas do Projeto Radam Brasil em escala de 1:1.000.000, abrangendo grande parte do território brasileiro; e o levantamento de solos realizado pelo IBGE em escala 1:250.000, disponível para dez estados da federação. Entretanto, essas escalas não são compatíveis com as atuais demandas, e os mapeamentos em detalhe não representam cobertura significativa do território nacional e estão vinculados a regiões restritas.

Dada a escassez e a grande demanda por informações sobre os solos, faz-se necessário o desenvolvimento de métodos modernos que permitam acelerar e melhorar o conhecimento pedológico do território nacional em escalas mais operacionais. Desse modo, o objetivo deste documento é realizar uma revisão teórica sobre principais métodos utilizados para o mapeamento de solos e contextualizá-lo com a realidade brasileira.

## Mapeamento de Solos

O levantamento pedológico é uma representação da distribuição geográfica dos solos, determinada por um conjunto de relações e propriedades do ambiente. Identifica e separa unidades de mapeamento, além de prever e delinear suas áreas na paisagem. As informações contidas num levantamento pedológico são essenciais para a avaliação do potencial e das limitações de uma área, constituindo uma base de dados para estudos de viabilidade técnica e econômica de projetos e planejamento de uso, manejo e conservação de solos (EMBRAPA, 1995; IBGE, 2007).

O objetivo principal de um levantamento pedológico é subdividir áreas heterogêneas em “parcelas homogêneas”, que apresentem a menor variabilidade possível, em função dos parâmetros de classificação e das características utilizadas para distinção dos solos em uma dada escala (EMBRAPA, 1995; IBGE, 2007).

Os levantamentos e mapeamentos de solos podem ser descritos por duas abordagens metodológicas:

Clássica ou tradicional, intitulada de método CIORPT, estabelecida por Dokuchaev (1949) e equacionada por Jenny (1941) nos primórdios da Ciência do Solo. Essa abordagem considera o solo como resultado da interação entre cinco fatores: clima (C), organismos (O), relevo (R), material de origem (P) e tempo (T).

Combinação de técnicas dos métodos CIORPT e técnicas quantitativas desenvolvidas a fim de melhorar as previsões das propriedades dos solos, comumente denominada Pedometria (McBRATNEY et al., 2000).

### Abordagem Tradicional de Levantamento de Solos

Na abordagem tradicional, a taxonomia de solos é o modelo usado pelo pedólogo para criar e distinguir as classes de solos e estabelecer seus

CARVALHO, C. C. N.; FRANCA-ROCHA, W.; SANTO, E. B. E. Predição de unidades de mapeamento digital de solo usando modelagem sob inferência *fuzzy*: estudo de caso em uma área na região de Mucugê, BA. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2007, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: INPE; SELPER, 2007. 1 CD-ROM. p. 305-312.

CATEN, A. **Aplicação de componentes principais e regressões logísticas múltiplas em sistema de informações geográficas para a predição e o mapeamento digital de solos**. 2008. 128 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

CATEN, A. **Mapeamento digital de solos: metodologias para atender a demanda por informação espacial em solos**. 2011. 108 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.

CATEN, A. T.; DALMOLIN, R. S. D.; RUIZ, L. F. C.; SEBEM, E.; PEREIRA, R. S. Mapeamento digital de solos através da aplicação de componentes principais em modelos logísticos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2009a. Natal. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2009. 1 CD-ROM. p. 7677-7684.

CATEN, A. T.; DALMOLIN, R. S. D.; SEBEM, L. F. C. R.; PEREIRA, E. R. S. Pedometria aplicada à predição de classes de solos utilizando de regressões logísticas múltiplas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2009b, Natal. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2009. 1 CD-ROM.

CATEN, A.; DALMOLIN, R. S. D.; MENDONÇA-SANTOS, M. L.; GIASSON, E. Mapeamento digital de classes de solos: características da abordagem brasileira. **Ciência Rural**, v. 41, n. 5, p. 812-816, 2012.

CATEN, A.; DALMOLIN, R. S. D.; RUIZ, L. F. C. Mapeamento de solos a partir de uma área de referência. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2011, Curitiba. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2011. 1 CD-ROM. p. 9073-9083.

CHAGAS, C. S. **Mapeamento digital de solos por correlação ambiental e redes neurais em uma bacia hidrográfica no domínio do mar de morros**. 2006. 233 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2006.

CHAGAS, C. S.; FERNANDES FILHO, E. I.; ROCHA, M. F.; CARVALHO JÚNIOR, W.; SOUZA NETO, N. C. Avaliação de modelos digitais de elevação para aplicação em um mapeamento digital de solos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, p. 218-226, 2010.

CNPq. 2012. **Diretório nacional dos grupos de pesquisa no Brasil**. Disponível em: <<http://dgp.cnpq.br/buscaoperacional/detalhegrupo.jsp?grupo=009250115BW6SO>>. Acesso em: 03 jan. 2013.

COELHO, F. B. **Comparação de métodos de mapeamento digital de solos através de variáveis geométricas e sistemas de informações geográficas**. 2010. 95 f. Dissertação

Washington State using weights-of-evidence GIS modeling. In: UNITED States Geological Survey. [Menlo Park, CA]: U.S. Dept. of the Interior, U.S. **Geological Survey**, 2001. p. 501-512.

BONHAM-CARTER, G. F. **Geographic information systems for geoscientists: modeling with gis**. Kidlington: Pergamon, 1994. 398 p.

BONISCH, S.; LOPES ASSAD, M. L.; MONTEIRO A. M. V.; CÂMARA, G. Representação e propagação de incertezas em dados de solo. II – atributos numéricos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 33-47, 2004.

BRITES, R. S. **Verificação de exatidão em classificação de imagens orbitais: efeitos de diferentes estratégias de amostragem e avaliação de índices de exatidão**. 1996. 101 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1996.

BUI, E. N.; LOUGHHEAD, A.; CORNER, R. Extracting soil landscape rules from previous soil surveys. **Australian Journal of Soil Research**, v. 37, n. 3, p. 495-508, 1999.

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**, 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**, v. 32, p. 643-659, 1981.

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

BURROUGH, P. A.; McDONNELL, R. **Principles of geographical information systems**. New York: Oxford University Press, 1998. 333 p. (Spatial Information Systems and Geostatistics).

CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M. V. 2001. **Introdução à Ciência da Geoinformação**. Disponível em: <<http://mtc-m12.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/sergio/2004/04.22.07.43/doc/publicacao.pdf>>. Acesso em: 01 nov. 2012.

CAMPLING, P.; GOBIN, A.; FEYER, J. Logistic modeling to spatially predict the probability of soil drainage classes. **Soil Science Society of America Journal**, v. 66, p. 1390-1401, 2002.

CARRÉ, F.; McBRATNEY, A. B.; MAYR, T.; MONTANARELLA, L. Digital soil assessments: Beyond DSM. **Geoderma**, v. 142, p. 69-79, 2007.

CARVALHO JUNIOR, W. **Classificação supervisionada de pedopaisagens do domínio dos mares de morros utilizando redes neurais artificiais**. 2005. 160 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005.

limites. Trata-se de um modelo intuitivo e determinístico, baseado na existência de relações entre os tipos de solos e o ambiente onde eles ocorrem (RANZANI, 1969).

Os métodos tradicionais de levantamentos de solos apoiam-se principalmente em observações de campo cujo número e intensidade por área mapeada variam conforme a escala e o nível de detalhe esperado na fotointerpretação e na delimitação de polígonos de classes de solos (EMBRAPA, 1995; IBGE, 2007; NEUMANN, 2012). As características gerais do solo são espacialmente representadas por um conjunto de polígonos com limites precisamente definidos e, em geral, delimitados pelos aspectos externos do terreno, como observado no campo e em fotografias aéreas (FUKE, 1998).

Inicialmente se realiza uma revisão de todas as informações sobre a área de estudo, que denominamos de trabalhos de escritório. Em seguida, os dados levantados são organizados e plotados na base cartográfica da área de estudo para iniciar os trabalhos de campo. No campo, são realizadas observações das feições da paisagem, relevo, topografia, tipo de vegetação, uso do solo para identificar os tipos de solos que possam ocorrer naquela área (RANZANI, 1969; EMBRAPA, 1995).

Uma vez diagnosticado as possíveis unidades que serão mapeadas, se procede à coleta de amostras de solos, que são etiquetadas, organizadas e encaminhadas para as análises laboratoriais, primordiais para a aferição das características químicas, físicas, mineralógicas e físico-hídricas de cada unidade de mapeamento. De posse dessas informações, conclui-se a interpretação final do mapeamento e elaborase o mapa final com sua respectiva memória descritiva, o relatório técnico final (RANZANI, 1969; EMBRAPA, 1995).

Com base em pressupostos e experiência, os pedólogos interpretam as características locais de topografia e vegetação como indícios de combinações dos fatores de formação dos solos. Dessa maneira, podem inferir os limites entre classes e propriedades dos solos (BURROUGH; MCDONNELL, 1998; NEUMANN, 2012).

O IBGE (2007) apresentou uma proposta para o mapeamento convencional do solo, sintetizada na Figura 1.



Figura 1. Fluxograma das etapas de mapeamento convencional de solos.

Fonte: Adaptado de IBGE (2007).

Vários aspectos do mapeamento tradicional vêm sendo questionados. Burgess et al. (1981), McBratney e Webster (1981), Burgess e Webster (1984), Burrough (1989), Lark e Beckett (1998) e Fuks (1998) discutiram o caráter discreto dos mapas tradicionais em oposição ao modelo contínuo, mais realístico. McBratney e Webster (1981), Burgess e Webster (1984) e Odeh et al. (1990) debatem que o método tradicional não considera a dependência espacial entre as unidades de mapeamento, importante principalmente em levantamentos detalhados ou em áreas onde os limites entre os solos não são evidentes. Zhu (1997) e Zhu et al. (2001) questionam sobre a precisão e a eficácia de levantamentos tradicionais, limitadas principalmente pela técnica de cartografia baseada em polígonos e pelo processo manual de produção do mapa de solo.

A subjetividade em trabalhos de levantamento de solos também é reconhecida e discutida. Nos métodos tradicionais, a delimitação das unidades de solos depende do conhecimento adquirido por meio da

Inicialmente, os trabalhos realizados são voltados à consolidação de metodologias digitais de mapeamento, como forma de confirmar que essa abordagem é capaz de gerar resultados similares ou melhores àqueles alcançados pela metodologia convencional de mapeamento. Uma vez consolidado, a aplicação do MDS passará de experimental para prática, podendo a partir daí se tornar uma ferramenta complementar ao mapeamento convencional, auxiliando a suprir as demandas de dados pedológicos.

## Referências

- ALMEIDA, C. M.; MONTEIRO, A. M. V.; CÂMARA, G. Modelos de dinâmica urbana: conceitos, derivação de relações, calibração, exemplos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11., 2003, Belo Horizonte. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2003.
- ARROUAYS, D.; DESLAIS, W.; BADEAU, V. The carbon content of topsoil and its geographical distribution in France. **Soil use and management**, v. 17, p. 7-11, 2001.
- ASADI, H. H.; HALE, M. A Predictive GIS model for potential mapping of gold and base metal mineralization in Takab area, Iran. **Computers & Geosciences**, v. 27, p. 901-912, 2001.
- ATKINSON, P. M.; TATNALL, A. R. L. Neural networks in remote sensing. **International Journal of Remote Sensing**, v. 18, p. 699-709, 1997.
- BAILEY, N.; CLEMENTS, T.; LEE, J. T.; THOMPSON, S. Modeling soil series data to facilitate targeted habitat restoration: a polytomous logistic regression approach. **Journal of Environmental Management**, v. 67, p. 395-407, 2003.
- BARROS, R. S.; CRUZ, C. B. M.; REIS, R. B.; COSTA JUNIOR, N. A. Avaliação do modelo digital de elevação do SRTM na ortorretificação de imagens Landsat 7 – área de aplicação: Angra dos Reis, RJ. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12., 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005. 1 CD-ROM.
- BISHOP, T. F. A.; McBRATNEY, A. B. A comparison of prediction methods for the creation of field-extent soil property maps. **Geoderma**, v. 103, p. 149-160, 2001.
- BITTENCOURT, G. **Inteligência artificial: ferramentas e teorias**. Florianópolis: UFSC, 1998. 400 p.
- BOLENEUS, D. E.; RAINES, G. L.; CAUSEY, J. D.; BOOKSTROM, A. A.; FROST, T. P.; HYNDMAN, P. C. Assessment method for epithermal gold deposits in northeast

**Tabela 2.** Continuação

Método de Mapeamento de Solos	Aspectos Positivos	Aspectos Negativos
Digital	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Eliminação da subjetividade durante a delimitação das unidades de mapeamento</li> <li>• Delimitação das classes baseada diretamente em dados morfométricos, por exemplo</li> <li>• Possibilidade de construir mapas de classes de solo com limites graduais</li> <li>• Mapeamento mais rápido e baixo custo</li> <li>• Possibilidade de extrapolação</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Identificação apenas das unidades de mapeamento condizentes com a escala da base de dados</li> <li>• Necessidade de conhecimento prévio da área de estudo, bem como de um mapeamento preliminar de solos</li> <li>• Necessidade de grande quantidade de dados amostrais de solos no campo e análises laboratoriais, de acordo com o método escolhido</li> </ul>

No Brasil, o mapeamento digital dos solos tem se afirmado com um número cada vez maior de artigos publicados em revistas científicas especializadas, bem como com a participação de pesquisadores brasileiros em publicações internacionais. Também, a criação da RedeMDS representa um grande avanço nos esforços para consolidar projetos em MDS.

Em face do grande desafio de produzir informação sobre a distribuição espacial de classes e atributos de solos para todo o território brasileiro, o mapeamento digital de solos será um grande aliado. Mas, segundo Caten (2011), em virtude do curto período de atividades, a pesquisa em MDS brasileira ainda não é resultado de grupos consolidados nessa linha de trabalho e, até o presente momento, o emprego do MDS para o suprimento das atuais demandas em dados pedológicos ainda não é uma realidade.

prática do cientista. Esse conhecimento é difícil de transmitir e, muitas vezes, não justifica uma tomada de decisão, uma vez que provém do saber empírico do pesquisador (HUDSON, 1992).

Somado a essas características, o levantamento tradicional é uma atividade onerosa, que demanda tempo e muitos deslocamentos ao campo. Além disso, a crescente preocupação ambiental e o grande desenvolvimento da agricultura de precisão demandaram novos levantamentos de solos em escala compatível com esses objetivos. Assim, torna-se cada vez mais necessário introduzir na pesquisa cartográfica dos solos ferramentas que auxiliem na execução dos procedimentos básicos de delimitação das unidades de solos, possibilitando avanços metodológicos (MCBRATNEY et al., 2003; NEUMANN, 2012).

## Pedometria

A metodologia tradicional de mapeamento de solos vem sendo criticada por seu caráter qualitativo, oneroso e demorado. Diante de tais críticas, surge a demanda de novos métodos quantitativos para caracterizar e avaliar com precisão as classes e os atributos dos solos, tornando os mapeamentos mais rápidos, reproduzíveis e comparáveis (MCBRATNEY; DEGRUIJTER, 1992).

Abordagens quantitativas têm sido desenvolvidas, especialmente nos últimos 30 anos, para descrever, classificar e estudar os padrões da distribuição e de variação do solo na paisagem de uma maneira mais objetiva (MCBRATNEY et al., 2000). Essas novas abordagens do estudo do solo são baseadas em modelos numéricos ou estatísticos das relações entre as variáveis ambientais e os atributos do solo, aplicados a um banco de dados geográficos, objetivando melhorar o conhecimento da variabilidade espacial, da precisão e da qualidade da informação, por meio de diversas técnicas quantitativas, denominadas pedometria (WEBSTER, 1984; MENDONÇA-SANTOS; SANTOS, 2003; SCULL et al., 2003).

Segundo McBratney et al. (2000), a palavra pedometria é um neologismo derivado da raiz grega pedos (solo) e metron (medição) e foi definida por Webster em 1984. A Pedometria não é nova, os métodos estatísticos e matemáticos têm sido aplicados aos estudos do solo desde a década de 1960, sendo reconhecida oficialmente como um ramo diferente da pedologia tradicional há pouco mais de duas décadas (McBRATNEY et al., 2000).

Em outras palavras, a Pedometria consiste na aplicação de métodos matemáticos e estatísticos para a modelagem do solo e seus atributos, com a finalidade de analisar sua gênese e distribuição (McBRATNEY et al., 2000; MENDONÇA-SANTOS; SANTOS, 2003; FIGUEIREDO, 2006; LAGACHERIE et al., 2007; CATEN, 2008; LOPÉZ, 2009; COELHO, 2010; SILVEIRA, 2010). Essa ciência possibilita a predição e espacialização de classes e atributos de solos na paisagem, estabelecendo relações matemáticas entre variáveis quantitativas (FIGUEIREDO, 2006).

A pedometria parte do princípio de que a matemática e os métodos numéricos e estatísticos podem resolver a complexidade e a falta de conhecimento sobre propriedades e processos inerentes a um sistema de solo (McBRATNEY, et al., 2000). Logo, os métodos pedométricos podem ser aplicados à predição de variáveis contínuas, que possuem uma distribuição suave e (ou) brusca ao longo do espaço (ex.: pH, cálcio, potássio, magnésio, argila, entre outros) e (ou) categóricas, que são agrupadas em classes formadas por conjuntos de atributos, como, por exemplo, classes texturais, classes de solo, estrutura, entre outros (LOPÉZ, 2009).

O domínio da pedometria pode ser definido por sua interdisciplinaridade (Figura 2), envolvendo a ciência do solo, a estatística-matemática aplicada e a ciência da geoinformação (HENGL, 2003; CATEN, 2008).

De forma geral, o MDS vem se consolidando e, cada vez mais, sua aplicabilidade é demonstrada. Segundo Caten (2011), a abordagem de solos tradicional e a digital são complementares e necessitam ser desenvolvidas simultaneamente. O levantamento de solos convencional produz as informações que são utilizadas para treinar os modelos e prever classes e propriedades de solos em áreas não mapeadas. A abordagem automatizada permite que extensas regiões sejam previamente mapeadas, otimizando recursos humanos e financeiros no mapeamento convencional.

Ambos os tipos de mapeamento, tradicional e digital, apresentam suas vantagens e limitações. Alguns desses aspectos puderam ser identificados ao longo da revisão (Tabela 2).

**Tabela 2.** Alguns aspectos gerais positivos e negativos do mapeamento de solos tradicional em relação ao digital.

Método de mapeamento de solos	Aspectos positivos	Aspectos negativos
Tradicional	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Discretização das classes de solos com maior acuidade em escalas de detalhe</li> <li>• Maior conhecimento e informação da área a ser mapeada</li> <li>• Estabelecimento das relações solo x paisagem x aptidão agrícola</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Método subjetivo relacionado à percepção do pedólogo</li> <li>• Necessidade de grande quantidade de dados amostrais de solos no campo e análises laboratoriais</li> <li>• Delimitação das classes a partir de interpretação de fotografias aéreas e caminhamento de checagem dos limites em campo</li> <li>• Limites rígidos entre as classes de solos</li> <li>• Mapeamento mais demorado e com elevado custo</li> </ul>

continua...

quantitativos. Assim, estudos em Pedometria e Mapeamento Digital de Solos que integram informações para predição de classes e atributos do solo são relevantes e oportunos.

O desenvolvimento de técnicas em MDS está fortemente relacionado à crescente disponibilização de dados auxiliares, como os modelos digitais de elevação (MDE), que são muitas vezes os principais dados de entrada e dos quais são derivados os atributos de terreno empregados nos modelos.

No Brasil, a utilização de produtos e informações geradas pelo sensoriamento orbital voltado para levantamentos planimétricos é realidade há mais de duas décadas. A maioria dos levantamentos é feita por aerofotogrametria, mas a disponibilização de MDEs na rede virtual, como os SRTM e ASTER, disponíveis para todo território nacional, contribui para a aplicação desse tipo de dado (BARROS, 2005).

Entretanto, Chagas et al. (2010) alertam para o fato de não haver nenhum órgão nacional responsável pela normatização de metodologias voltadas para a criação de modelos digitais – elaboradas pelos próprios usuários –, que carecem de atenção quanto às limitações como fonte de informação espacial. Também é necessário ressaltar que nem sempre existem MDEs disponíveis em escala adequada à realização de mapeamentos em detalhe. Os erros advindos dos MDEs podem ter grande influência durante o processo de modelagem e predição de classes/atributos, visto que interferem na qualidade do fator relevo e, conseqüentemente, nos atributos de terreno a serem gerados (CATEN, 2011).

Em relação às metodologias empregadas para o MDS discutidas neste trabalho, é válido ressaltar que a aplicação da metodologia adequada está relacionada a fatores como as características da área de estudo, tipos de dados de entrada, finalidade e resolução do mapeamento, configuração da pesquisa e o uso final das informações geradas. Portanto, uma técnica ou método não pode ser aplicado a qualquer situação sem a prévia consideração das necessidades específicas do levantamento e da adequação dos pressupostos inerentes à própria metodologia (McBRATNEY et al., 2000).



**Figura 2.** A interdisciplinariedade da Pedometria.

Fonte: Adaptado de Hengl (2003).

A primeira tentativa de estabelecer uma abordagem quantitativa sobre solos veio da obra de Dokuchaev (1949), aperfeiçoada por Jenny em 1941 (McBRATNEY et al., 2000). Jenny equacionou o solo em função dos fatores de formação estabelecidos por Dokuchaev (1949), como apresentado na Equação 1. Esse modelo ficou conhecido como CLORPT (McBRATNEY et al., 2003):

$$\text{Solo} = f(\text{cl}, \text{o}, \text{r}, \text{p}, \text{t} \dots) \quad \text{Equação 1}$$

Em que:

cl = variável clima

o = organismos

r = relevo

p = material de origem

t = tempo

.... = fatores não determinados

A partir dessa equação, muitos pedólogos passaram a propor funções, demonstrando associações entre o solo e os fatores de formação. Rowell (1994) considerou que as atividades humanas interferem nas taxas de formação, erosão e propriedades do solo, no comportamento da água e na biodiversidade, e estabeleceu o manejo (m) como um novo fator de formação do solo (Equação 2).

$$\text{Solo} = f(\text{cl}, \text{o}, \text{r}, \text{m.o.})t_1 + (\text{m})t_2 \quad \text{Equação 2}$$

Em que:

cl = variável clima.

o = organismos.

r = relevo.

m.o. = material de origem.

$t_1$  = tempo de formação do solo antes da intervenção humana.

$t_2$  = o tempo desde que o solo começou a ser usado (ROWELL, 1994; VELDKAMP et al., 2001; TURETTA et al., 2010).

Vários outros estudos foram desenvolvidos a fim de descrever de forma quantitativa relações entre os fatores componentes do modelo CLORPT, mas muitas vezes ele foi considerado apenas como uma lista qualitativa dos fatores que poderiam ser importantes para a compreensão da formação e organização dos solos na paisagem (McBRATNEY et al., 2003; LOPEZ, 2009).

Historicamente, os primeiros levantamentos quantitativos do solo foram realizados na década de 1950 por demandas externas à área agrônômica, executados por civis e militares. Somente a partir dos anos 1960, com a evolução da informática e o avanço em teorias matemáticas, ocorreram o desenvolvimento e a consolidação da Pedometria (WEBSTER, 1994; CATEN, 2008).

foi criado com representantes dos cinco continentes e coordenação do World Soil Information (ISRIC) (CNPq, 2012).

Em 2011, pesquisadores da Embrapa Solos promoveram a criação de uma rede de pesquisa para reunir profissionais atuantes na área. A Rede Brasileira de Pesquisa em Mapeamento Digital de Solos (RedeMDS), formada com recursos de edital CNPq/Embrapa, que reúne 58 membros de 25 instituições de ensino, pesquisa e extensão rural, pretende elaborar projetos de ação conjunta e integrada para o mapeamento digital em alta resolução dos solos do Brasil e gerar sinergia entre os pesquisadores brasileiros para promover o avanço da pesquisa em MDS (EMBRAPA, 2012).

### **Considerações Finais e Tendências Futuras para o Mapeamento Digital do Solo**

No Brasil, a demanda pelo mapeamento de solos é constante, ressaltando a necessidade de detalhamento nas informações e dados para a produção dos mapas pedológicos, requeridos para o desenvolvimento social e econômico planejado aliado ao uso sustentável dos recursos naturais. Nesse contexto, o mapeamento tradicional do solo representa um processo lento e de custo elevado, que, conseqüentemente, não permite a rápida realização/atualização dos levantamentos, a disponibilização de dados em escala adequada e o aumento da acurácia dos mapas de solos (ZHU et al., 2001; McBRATNEY et al., 2003).

Considerando as demandas dos levantamentos de solos e a falta de informações sobre os solos em escala adequada, o desafio que se coloca no país é como definir uma nova abordagem para a cartografia dos solos de modo a inferir a distribuição espacial de classes e propriedades de solos para todo o território brasileiro.

Dessa maneira, é mais que necessário o desenvolvimento de pesquisas para a adoção e sistematização de novas técnicas e métodos para tornar os levantamentos de solos mais rápidos, menos onerosos e mais

## Mapeamento Digital de Solos no Brasil

O mapeamento de classes de solos empregando técnicas de MDS é recente no país, datando do início dos anos 2000 (CATEN et al., 2012). Segundo Caten et al. (2012), o despertar mais recente dos cientistas do solo brasileiros para o MDS pode estar ligado a fatores como: disponibilização bem mais tardia de software e hardware no país; conservadorismo de muitos pedólogos que relutam em utilizar sistemas automatizados; carência de pessoal qualificado para o emprego da tecnologia da informação na ciência do solo; popularização mais recente no Brasil de tecnologias como sistema de posicionamento global e sensoriamento remoto.

Entretanto, um número crescente de trabalhos em Pedometria e mapeamento digital de solos vem sendo realizados no Brasil. Segundo Caten et al. (2012), em 2011, foram publicados cinco trabalhos brasileiros.

Grande parte dos estudos realizados no Brasil concentra-se no Estado do Rio Grande do Sul. Isso pode ser atribuído à presença de dois grupos de pesquisa que desenvolvem atividades naquele Estado (Universidade Federal de Santa Maria e Universidade Federal do Rio Grande do Sul) (CATEN et al., 2012). Esse fato ressalta a importância de expandir as técnicas de MDS a outras regiões do país, visto que os vazios cartográficos em solos, segundo Mendonça Santos e Santos (2007), concentram-se principalmente nas regiões Norte e Noroeste do Brasil.

Várias iniciativas vêm sendo tomadas para ampliar e disseminar a aplicação do mapeamento digital de solos no Brasil. Em 2006, a Embrapa Solos organizou o *2nd Global Workshop on Digital Soil Mapping*, no Rio de Janeiro, com o apoio da *International Union of Soil Sciences* e da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, que reuniu 75 pesquisadores de 17 países para apresentar e discutir os avanços em mapeamento digital de solos. Uma seleção de artigos foi publicada como livro, intitulado *Digital soil mapping with limited data* (HARTEMINK et al., 2008). Após o Workshop do Rio de Janeiro, um Consórcio Global para o Mapeamento Digital de Propriedades dos Solos

A Pedometria começou a popularizar-se e a desenvolver-se como ciência no início da década de 1990 (McBRATNEY et al., 2000). Em 1994, foi realizada a primeira conferência de pedometria, cujos trabalhos foram publicados no volume 62 da revista *Geoderma* do mesmo ano. Foi em 1994 que surgiu um grupo de trabalho intitulado de *Pedometrics Society* vinculada a *International Union of Soil Science*, que, pós uma década de existência, foi elevado à condição de Comissão da Sociedade Internacional no XVII Congresso Mundial de Ciência do Solo (FIGUEIREDO, 2006).

Inicialmente, os estudos em pedometria buscavam determinar de forma quantitativa as propriedades do solo, entretanto sem incluir o componente espacial. O objetivo dessas investigações era compreender a formação do solo, e não necessariamente prever seus fatores e sua espacialização (McBRATNEY et al., 2003). A própria abordagem-chave da Pedometria, o modelo CLORPT, não considerou o componente espacial (McBRATNEY et al., 2003; CATEN, 2008).

O desenvolvimento dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e a incorporação da geoestatística na metodologia da Pedometria no final dos anos 1960 permitiram uma ênfase nas abordagens geográficas, e os atributos do solo passaram a ser considerados a partir de sua posição espacial. Reconheceu-se que os padrões do solo poderiam ser mais bem explicados se as variáveis do solo fossem consideradas como variáveis regionalizadas (McBRATNEY et al., 2003).

A abordagem geográfica em Pedometria surgiu da necessidade de aplicação da predição espacial para confecção de mapas de solos, e sua evolução foi acompanhada pela utilização de SIG, dados digitais, sensoriamento remoto e técnicas avançadas em geoestatística. Esses fatores permitiram a incorporação da abordagem espacial ao CLORPT de Jenny, gerando o modelo SCORPAN (McBRATNEY et al., 2003), que incorpora as variáveis solo e coordenada geográfica. No modelo SCORPAN, as classes de solo e seus atributos podem ser previstos a partir de sete fatores: (s): o próprio solo; (c): o clima; (o): organismos vivos; (r): atributos da paisagem (relevos); (p): material de origem

(litologia); (a): o tempo; e (n): as coordenadas geográficas.

A combinação dos fatores forma as funções (Equações 3 e 4):

$$\text{Solo} = f(s, c, o, r, p, a, n) \quad \text{Equação 3}$$

Em que:

Sc = previsão de classes de solo (discretas).

Ou:

$$\text{Solo} = f(s, c, o, r, p, a, n) \quad \text{Equação 4}$$

Em que:

Sa = previsão de atributos do solo (contínuos)

O fator s representa a previsão de uma classe ou atributo do solo por meio de informações pedológicas pré-existentes e funções de pedotransferência. O fator n considera a posição espacial do solo (McBRATNEY, 2003). Segundo Caten (2008), o modelo SCORPAN pode ser visto como uma evolução do modelo CLORPT de Jenny e compreende uma síntese das tecnologias utilizadas atualmente para a inferência espacial do solo.

Atualmente, na maioria dos trabalhos, o uso das técnicas pedométricas é empregado para a descrição da variabilidade espacial do solo, consolidada através da confecção de mapas digitais de solo (MDS) (LOPÉZ, 2009).

## Mapeamento Digital do Solo (MDS)

O Mapeamento Digital do Solo pode ser definido como a criação e manipulação de sistemas de informação espacial do solo por meio de modelos numéricos usados para inferir variações espaciais e temporais das propriedades e tipos de solo a partir da observação e conhecimento

aos dados de referência. Os valores na diagonal corresponderão aos dados corretamente preditos (CATEN, 2008). A matriz de erros ou de confusão identifica o erro global da classificação para cada classe de solo, mostrando também como se deram as confusões entre as classes (LILLESAND; KIEFFER, 1994), informando os erros de omissão e comissão para cada classe.

Um dos índices empregado para estimar a qualidade do mapa gerado é o de Exatidão Global (BRITES, 1996), também denominado de Acurácia Geral (AG) (CATEN, 2008), que corresponde ao total de dados corretamente preditos dividido pelo total de amostras.

Outro índice utilizado para mensurar a exatidão dos mapas gerados é o Kappa (K), que representa inteiramente a matriz de confusão por empregar o índice Exatidão Global ou Acurácia Geral e os erros de omissão e comissão. O índice Kappa mede a proporção de concordância entre os dados desconsiderando-se a concordância em virtude da casualidade (VILELA, 2002). O índice K é bastante utilizado para testar a qualidade de mapas preditivos. Geralmente, os valores obtidos na literatura permeiam entre 0,3 e 0,6, entretanto considera-se como satisfatórios valores Kappa acima de 0,7 (GONG; HOWARD 1990; FIGUEIREDO 2006; CATEN et al., 2009a).

Esses estimadores de qualidade são classificados como métodos estatísticos multinominais e contemplam considerações sobre a frequência do erro (proporção da área do mapa que não concorda com a realidade), a natureza do erro (classes não mapeadas corretamente e com quais classes se confundem), magnitude do erro (o quão importante o erro é para o usuário) e fonte do erro (a razão da ocorrência do erro) (FIGUEIREDO, 2006; CATEN et al., 2009a).

Fuks (1998) ressalta que a qualidade e a utilidade dos mapas digitais são resultantes da qualidade da informação e dos procedimentos utilizados, ambos intimamente associados à forma como os dados estão representados.

Vários autores vêm aplicando lógica *fuzzy* para o mapeamento de classes de solos e de propriedades do solo, como Zhu (1997), Zhu et al. (2001, 2010a, 2010b) e Carvalho et al. (2007). Com esses estudos, verificou-se a possibilidade de fazer predição de classes e de propriedades do solo a partir de dados auxiliares, demonstrando que a lógica *fuzzy* é uma técnica potencialmente capaz de operacionalizar os trabalhos em levantamentos de solo.

Zhu et al. (2010a) empregaram lógica *fuzzy* para gerar um mapa de classes de solos e um mapa de conteúdo de matéria orgânica, utilizando como dados de entrada variáveis topográficas e amostras de solo em uma bacia experimental na China. Carvalho et al. (2007) utilizaram dados advindos de MDT, vegetação e geologia, associados ao conhecimento do pedólogo e integrados em ambiente SIG sob inferência *fuzzy* para gerar um mapa digital de classes de solo na região da Chapada Diamantina, BA.

### Avaliação da Qualidade dos Mapas Digitais

O mapeamento do solo, sejam quais forem as técnicas utilizadas, não estará completo se não for verificada a qualidade da informação contida no mapa (CATEN, 2008). Lagacherie (2008) afirma que a sistematização e a aplicação de uma metodologia de avaliação de precisão são provavelmente o maior desafio do mapeamento digital do solo. O número de contribuições dedicadas especificamente a esse assunto é pequeno.

Uma alternativa para reportar o erro contido em um mapeamento de solos é a preparação de uma matriz de erros ou confusão. Essa matriz mostra a tabulação cruzada entre duas informações, por exemplo, dois mapas gerados por metodologias diferentes ou informações de campo. Uma série de procedimentos estatísticos poderá ser aplicada à matriz de erros. As linhas da matriz são preenchidas com os dados inferidos e, nas colunas, são marcados os valores correspondentes

do próprio solo e das variáveis ambientais correlacionadas (LAGACHERIE, 2008).

O mapeamento digital baseia-se em estabelecer relações matemáticas entre variáveis ambientais e classes de solos, com o objetivo de prever a distribuição espacial das classes de solos e gerar mapas pedológicos com semelhança significativa aos mapas tradicionais (COELHO, 2010). Trata-se do mapeamento de classes e (ou) atributos do solo baseado no uso de técnicas pedométricas e ferramentas computacionais, geralmente associados a métodos perceptivos de observação em campo e laboratório (LOPÉZ, 2009).

Sob a ótica da função Scorpan proposta por McBratney et al. (2003), o mapeamento digital de solos pode ser interpretado como o estabelecimento de relações matemáticas entre o solo e variáveis ambientais (Figura 3).

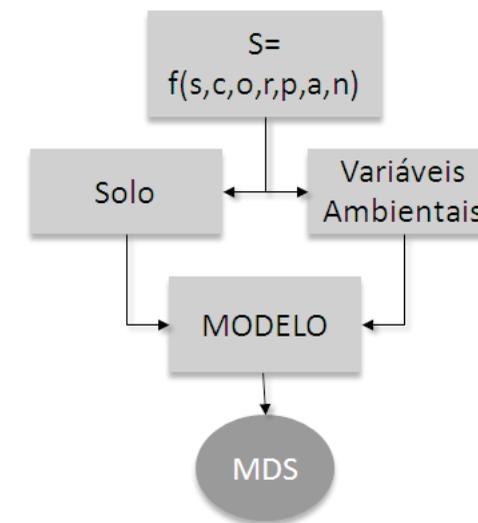
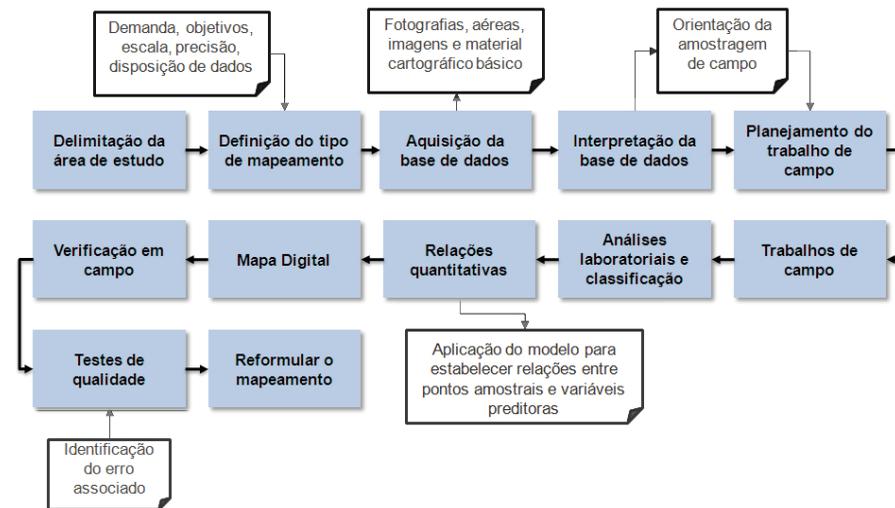


Figura 3. Mapeamento digital de solos (MDS) a partir da função SCORPAN.

McBratney et. al (2003) apresentaram os procedimentos empregados para a elaboração de um mapa digital de solos (Figura 4).



**Figura 4.** Fluxograma das etapas de mapeamento digital de solos.

Fonte: Adaptado de McBratney et al. (2003).

Figueiredo (2006) exemplificou os procedimentos envolvidos no mapeamento de classes de solo por métodos pedométricos. A partir de Modelo Digital de Terreno (MDT), são extraídos os atributos selecionados para o modelo (no caso, o relevo, com dados topográficos). Posteriormente, são estabelecidas relações matemáticas entre os atributos e as informações de solo existentes sobre a área. Com base nessas relações, é estimado o novo mapa de solos com a possibilidade de extrapolação da informação para as áreas circunvizinhas.

Uma grande vantagem do mapeamento digital de solos é a possibilidade de utilizar a modelagem para extrapolar a informação obtida para áreas com características ambientais semelhantes que não possuem informações sobre solo.

A capacidade de predição do mapa bem como sua qualidade estão relacionadas à qualidade dos dados de entrada e à adequação do método matemático utilizado (COELHO, 2010).

**Tabela 1.** Operadores *fuzzy*.

Operador	Definição
AND	Define o menor membro que controla os conjuntos <i>fuzzy</i> , proporcionando estimativas conservadoras
OR	Controla os arquivos de saída a partir do maior valor do membro <i>fuzzy</i> , que torna as estimativas mais otimistas
Produto	Combinação que obedece uma função entre o valor do membro <i>fuzzy</i> e o número de mapas a serem combinados. Usando este operador, os valores tendem a ser pequenos
Soma	É complementar ao produto algébrico, sendo o resultado sempre maior ou igual ao maior membro <i>fuzzy</i>
Gamma	É definido a partir do produto e soma algébrica <i>fuzzy</i>

Fonte: Silva (2003).

Segundo Miranda (2005), a lógica *fuzzy* deve ser usada de maneira criteriosa de acordo com a escala de trabalho. Se a escala for pequena, é perfeitamente viável trabalhar com lógica booleana sem nenhum prejuízo maior para as conclusões. Se o trabalho for em grande escala e se a precisão das conclusões estiver em jogo, será indicado o uso da lógica *fuzzy*, isso aliado ao fato de se conhecer bem o comportamento da variável ambiental sendo estudada para definir o tipo de função de pertinência e os limites que serão usados.

O emprego da lógica *fuzzy* na pedometria possibilita a alocação de indivíduos, como os pedons, de acordo com o grau de pertinência do indivíduo em relação a cada classe de solo mapeada. O grau de pertinência será determinado pelo desvio dos atributos dos indivíduos em relação aos valores de atributos considerados como típicos para cada classe de solo. As classes de solo obtidas por meio do emprego de lógica *fuzzy* podem representar as transições graduais entre os solos.

objetos 'Z', um conjunto *fuzzy* 'A' nesse universo 'Z' é um conjunto de pares ordenados, conforme a Equação 5, descrita por Câmara et al. (2001).

$$A = (Z, FP_A^F(O_z)) \text{ para todo } O_z \in Z, \quad \text{Equação 05}$$

Em que:

$FP_A^F(O_z)$  = função de pertinência *fuzzy* do conjunto 'A'

O valor da função pode ser entendido como o grau de compatibilidade do objeto  $O_z$  com o conjunto 'A', sendo o objeto  $O_z$  pertencente ao universo 'Z' ( $O_z \in Z$ ).

Segundo Câmara et al. (2001), a função  $FP_A^F(O_z)$  é um número entre 0 e 1, sendo: (a) 1, quando a compatibilidade entre o conjunto 'A' e o objeto  $O_z$  for total; (b) um valor entre 1 e 0, quando a compatibilidade não for total; e (c) zero, quando não houver nenhuma compatibilidade entre o objeto e o conjunto em análise.

A função que define um conjunto *fuzzy* pode assumir várias formas de acordo com as características dos dados avaliados. As formas mais comuns são linear, não linear, normal, gaussiana, ascendente, descendente e sigmoide (BURROUGH; MCDONNELL, 1998).

Assim como em conjuntos booleanos, dados em conjuntos *fuzzy* podem ser manipulados utilizando métodos lógicos para selecionar e combinar dados de vários conjuntos. Vários operadores podem ser utilizados de forma a se obter um mapa resultante da sobreposição de vários planos de informação *fuzzy* (MEIRELLES, 1997). Bonham-Carter (1994) apresenta alguns operadores *fuzzy*, denominados: *fuzzy* AND; *fuzzy* OR; produto algébrico *fuzzy*; soma algébrica *fuzzy*; e gamma. Esses operadores são apresentados detalhadamente na Tabela 1.

A abordagem pedométrica para o mapeamento do solo é bastante diferente da abordagem tradicional. O levantamento de solos convencional é baseado na fotointerpretação e delimitação de polígonos de solos, enquanto as técnicas pedométricas são, principalmente, baseadas na predição do solo por meio de algum método quantitativo (HENGL, 2003; NEUMANN, 2012). Também se diferem em relação à escala, uma vez que, nos mapas digitais, não há escala, e sim resolução (LAGACHERIE et al., 2007; NEUMANN, 2012).

O mapeamento digital de solos experimentou um rápido desenvolvimento de métodos novos e econômicos, devido à crescente disponibilidade de mapas auxiliares. Nesse sentido, pode-se ressaltar a participação de dois grupos principais, as imagens de sensoriamento remoto orbital e os atributos do terreno derivados de modelos digitais de elevação (DOBOS et al., 2000; SILVEIRA, 2010).

À medida que novas informações e novas fontes de dados vão sendo disponibilizados e incorporados às bases de dados, os mapas digitais podem ser atualizados e modificados mais facilmente, tornando-se produtos dinâmicos. Dessa forma, sua acurácia pode ser melhorada com menor custo e de forma mais rápida (CARRÉ et al., 2007; LOPÉZ, 2009).

O mapeamento digital de solos pode ajudar a suprir a falta de dados de solos proveniente da lentidão e dos altos custos dos métodos tradicionais (McBRATNEY et al., 2003). No Brasil, o potencial dos MDS ainda não está sendo completamente explorado. São poucos os trabalhos desenvolvidos, apresentando abrangência limitada, e muitas vezes realizados por empresas particulares (LOPÉZ, 2009).

### Principais métodos utilizados em mapeamentos digitais de solos

McBratney et al. (2003) apresentam uma diversidade de formas de se confeccionar um mapa digital de solos. Os autores classificam os modelos de predição de solos como Funções Espaciais de Predição do Solo (Soil Spatial Prediction Function – SSPF) quando seguem a função Scorpan, denominando esses modelos de "scorpan-SSPF".

McBratney et al. (2003) estabeleceram os procedimentos a serem executados em um modelo scorpan-SSPF. Inicialmente, definem-se os atributos de interesse do solo e a resolução do mapeamento, e reúnem-se os dados que serão necessários ao modelo. Então se estabelece as relações quantitativas, gerando-se os mapas digitais. Uma amostragem de campo ou laboratorial deve ser realizada para confirmação e testes de qualidade. Se necessário, o modelo deve ser ajustado de acordo com a taxa de erros.

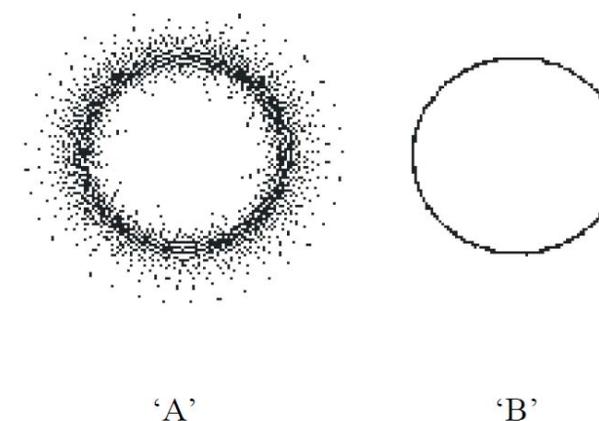
Para estabelecer as relações quantitativas entre os atributos do modelo, diversos métodos têm sido desenvolvidos, considerando dados digitais e modelos de estatística clássica, geoestatística ou a combinação das duas, evidenciando a relação da paisagem e das classes pedológicas (McBRATNEY et. al., 2000).

A escolha e a aplicação da técnica dependem da finalidade, resolução e configuração da pesquisa e o uso final das informações geradas. Esses aspectos também determinarão a precisão do modelo. Portanto, uma técnica ou método não pode ser aplicado a qualquer situação sem a prévia consideração das necessidades específicas do levantamento e da adequação dos pressupostos inerentes à própria metodologia (McBRATNEY et al., 2000).

Algumas técnicas comuns em mapeamento digital de solos serão apresentadas como Geoestatística, Regressão Linear Múltipla, Regressão Logística, Pesos de Evidência, Árvore de Decisão/Classificação, Redes Neurais e Lógica *Fuzzy*.

### **Geoestatística**

A Geoestatística possui suas bases na teoria de variáveis regionalizadas, que considera a variabilidade espacial de uma determinada variável do solo como uma função aleatória, sendo representada por um modelo estocástico. Segundo Mendonça-Santos e Santos (2003), desde o início dos anos 1980, o método geoestatístico, denominado Krigagem (kriging), é aplicado para interpolação espacial dos solos.



**Figura 5.** Diagrama de Venn ilustrando a diferença de limites entre um conjunto *fuzzy* (A) e um conjunto boleano (B).

Fonte: Burrough (1998).

A lógica *fuzzy* permite criar classes contínuas bem mais flexíveis, onde um indivíduo pode pertencer totalmente, pertencer parcialmente ou não pertencer à determinada classe, variando o grau de pertinência entre 0 e 1 (McBRATNEY et al., 2000; CÂMARA et al., 2001; ALMEIDA et al., 2003; McBRATNEY et al., 2003; MENDONÇA-SANTOS; SANTOS, 2003), ou seja, os valores que pertencem estritamente a uma classe assumem o valor de pertinência 1. À medida que os membros se afastam do valor central, são definidos numa amplitude de valores de pertinência com tendência a zero (SILVA, 2003).

Para caracterizar formalmente um conjunto *fuzzy*, pode-se recorrer ao conceito de função de pertinência ( $F_p$ ). Dado o valor de um atributo  $z$ , a função de pertinência determina se o elemento avaliado pertence ou não a um determinado conjunto em análise (CÂMARA et al., 2001).

Segundo Câmara et al. (2001), um conjunto *fuzzy* pode ser definido matematicamente da seguinte forma: dado o universo de amostras ou

considerada como análise algébrica de mapas não cumulativa ou análise lógica (NEUMANN, 2012). A lógica *fuzzy* é definida como “a parte da lógica matemática dedicada aos princípios formais do raciocínio incerto ou aproximado, portanto, mais próxima do pensamento humano e da linguagem natural” (KATINSKY, 1994). A lógica *fuzzy* é uma ampliação da teoria convencional de conjuntos, e sua utilização é apropriada em sistemas que se caracterizam pela generalidade, ambiguidade e imprecisão (FUKS, 1998).

As primeiras aplicações de lógica *fuzzy* datam de 1974, tanto no campo experimental como no campo industrial. Vários exemplos de aplicação de lógica *fuzzy* podem ser encontrados na engenharia, medicina, ciências naturais e muitas outras ciências (SILVA, 2003).

A teoria dos conjuntos *fuzzy* tem sido amplamente utilizada em ciência do solo para classificação e mapeamento. O desenvolvimento de técnicas digitais de mapeamento de solo baseado em lógica *fuzzy* tem atraído atenção por causa da capacidade de capturar e representar a natureza contínua de variação espacial do solo. (McBRATNEY; ODEH, 1997; ZHU, 1997; McBRATNEY et al., 2000; ZHU et al., 2001; McBRATNEY et al., 2003; MENDONÇA-SANTOS; SANTOS, 2003; ZHU et al., 2010a). A aplicação dos métodos *fuzzy* nos mapeamentos possibilita a definição de classes sem o estabelecimento de limites precisos, e, por essa razão, mais adequados às mudanças graduais que ocorrem no solo (FUKS, 1998).

Segundo Bonisch (2004), a lógica *fuzzy* tem como objetivo modelar o raciocínio humano, possibilitando trabalhar com informações incertas ou imprecisas, fornecendo respostas para questões baseadas em conhecimentos inexatos, incompletos ou não totalmente confiáveis. É um método de caracterização de classes que, por várias razões, não têm ou não podem definir limites rígidos entre classes (Figura 5) (CÂMARA et al., 2001; ALMEIDA et al., 2003).

A Krigagem é um procedimento de inferência espacial que apresenta uma etapa de análise variográfica, anterior aos procedimentos inferenciais, em que se modela a estrutura da covariância espacial. O variograma experimental é estimado das amostras obtidas e utilizado somente para o ajuste dos modelos teóricos que sejam funções admissíveis. Os modelos escolhidos devem se aproximar da configuração do variograma experimental (FUKS, 1998).

As principais limitações da técnica geoestatística univariada da krigagem estão relacionadas à: (a) hipótese de estacionaridade requerida e que frequentemente não é encontrada em conjuntos de dados de campo; (b) grande quantidade de dados necessários para definir a autocorrelação espacial; e (c) situações de complexidade do terreno e dos processos de formação do solo (McBRATNEY et al., 2000).

Burgess e Webster (1980) aplicaram krigagem para a interpolação espacial dos solos. Odeh e McBratney (2000) compararam métodos de regressão krigagem e regressão linear para estimar teores de argila no solo. Bishop e McBratney (2001) utilizaram MDE, fotos aéreas, imagens Landsat TM, dados de monitoramento de colheita, condutividade elétrica e amostras de solo para estimar a capacidade de troca de cátions (CTC), por meio de regressão linear múltipla, modelos aditivos, árvores de regressão, krigagem dos resíduos desses modelos, krigagem ordinária e krigagem com deriva externa.

### **Regressão linear múltipla**

As regressões lineares são comumente aplicadas no meio científico para estudar a relação entre as variáveis do solo e fazer previsões. Essas regressões assumem a existência de uma relação linear entre as variáveis dependentes e independentes (BAILEY et al., 2003; NEUMANN, 2012).

Em geral, a equação de regressão linear múltipla é calculada por meio do método de mínimos quadrados, e o grau de associação entre a variável dependente e as variáveis independentes é expresso pelo coeficiente de determinação ( $R^2$ ), cuja significância estatística é

avaliada com base no teste F ou teste t (BAILEY et al., 2003).

O sucesso ao se ajustar uma função para descrever o solo depende do número de variáveis de predição observadas, da densidade de amostras para estabelecer a relação, da disponibilidade e flexibilidade de funções para ajuste de relações não lineares e da relação entre solo e meio ambiente (McBRATNEY et al., 2003).

As regressões lineares foram amplamente utilizadas em pedometria para estimar propriedades, realizar classificações para as estimativas de classes de solo e em representações espaciais de solo (MOORE et al., 1993; SKIDMORE et al., 1997; LEE et al., 1998; ODEH; McBRATNEY, 2000; ARROUJAYS et al., 2001; BISHOP; McBRATNEY, 2001; THOMPSON et al., 2001; FLORINSKY et al., 2002; HENGL et al., 2002; NEUMANN et al., 2011).

Arrouays et al. (2001) estimaram o conteúdo de C orgânico no solo a partir da matéria orgânica, textura, variáveis climáticas, variáveis de terreno e ocupação do solo no sul da França. Skidmore et al. (1997) utilizaram imagens Landsat e amostras de solo para estimativa de teor de P e valor de pH por meio de regressão linear em uma área silvícola na Austrália. Neumann et al. (2011) utilizaram a técnica de regressão linear para o mapeamento digital de solos na Bacia do Ribeirão do Gama, Distrito Federal.

### ***Regressão logística múltipla (RLM)***

As regressões logísticas estabelecem relações matemáticas entre variáveis dependentes discretas e variáveis independentes contínuas ou discretas. Essas relações podem ocorrer entre uma, duas ou mais variáveis preditoras contínuas ou discretas com uma variável resposta descontínua apresentando várias classes (regressão logística binária) (CAMPLING et al., 2002; NEUMANN, 2012).

As regressões logísticas são semelhantes às regressões lineares comuns, diferenciando-se quanto ao tipo de variável resposta e também pelo comportamento sigmoide da sua curva de resposta. As regressões logísticas apresentam duas funções principais: a descritiva, que retrata

que as técnicas estatísticas, já que esse método não requer parâmetros para a distribuição dos dados. As RNAs se organizam de forma semelhante aos neurônios do cérebro humano, formando uma estrutura de processamento simples dos elementos, constituída por entradas e saídas (ATKINSON; TATNALL, 1997).

Carvalho Jr. (2005) utilizou redes neurais para estudar as inter-relações entre solos e paisagens rurais no Domínio dos Mares de Morros na região Noroeste do Estado do Rio de Janeiro, buscando reconhecer o arranjo dos componentes geológicos, geomorfológicos, hidrológicos, pedológicos e climáticos.

Chagas (2006) aplicou redes neurais para a predição de classes de solo em uma região montanhosa do Domínio do Mar de Morros e Alinhamentos Serranos no Noroeste do Estado do Rio de Janeiro, utilizando atributos de terreno e dados de sensores remotos.

Sirtoli et al. (2008) utilizaram uma rede multicamadas, alimentada com algoritmo de aprendizado de retropropagação de erro otimizado para predição das unidades preliminares de mapeamento de solos. Silveira (2010) empregou redes neurais artificiais e tabulação cruzada para integrar dados topográficos derivados de MDT e gerar mapas com classes preliminares de solo na Bacia do Rio Iraí, PR.

### ***Lógica fuzzy***

O conceito de lógica *fuzzy* se originou do fato de que certos fenômenos não têm fronteiras claramente definidas. A teoria dos conjuntos *fuzzy* foi desenvolvida para tratar dos problemas do processamento de informações da linguagem natural, cujos conceitos centrais são bem definidos, mas a definição de fronteira é vaga. A lógica *fuzzy* é uma generalização da teoria da álgebra de Boole, em que um membro pode assumir dois estados: falso (0) ou verdadeiro (1). Na lógica *fuzzy*, existem vários membros entre a negação absoluta (0) e a verdade absoluta (1) (MIRANDA, 2005).

A lógica *fuzzy* foi criada por Lofti A. Zadeh, no início de 1960, e é

normalmente transportam dados numéricos, codificados por uma variedade de meios e organizados em camadas. Os dados podem receber pesos diferentes e não existe uma estrutura assumida para o modelo. Em vez disso, as redes são ajustadas ou “treinadas” de modo que uma determinada entrada leva a um destino específico de saída (HENGL, 2003; McBRATNEY et al., 2003).

O modelo matemático de uma rede neural é composto por um conjunto simples de funções ligadas entre si por pesos. A rede consiste em um conjunto de unidades de entrada e de saída, e unidades ocultas, que ligam as entradas e saídas. As unidades ocultas extraem informações úteis a partir de entradas e usam essas informações para prever as saídas (McBRATNEY et al., 2003).

Entre as principais características das redes neurais artificiais pode-se citar: a capacidade de aprender e ser treinada, por meio de exemplos, generalizando o aprendizado e aplicando-o em situações antes não confrontadas ou não apresentadas previamente; o bom desempenho em tarefas mal definidas, nas quais falta o conhecimento explícito sobre como encontrar uma solução; e não requerer conhecimento a respeito de eventuais modelos matemáticos (BITTENCOURT, 1998; McBRATNEY et al. 2003; MENDONÇA-SANTOS; SANTOS, 2003; SILVEIRA, 2010; NEUMANN, 2012).

As vantagens das redes neurais são a possibilidade de manipulação eficiente de grandes quantidades de dados e sua capacidade de generalização. As principais razões para seu uso são que: a priori, as redes neurais não assumem nenhum tipo de distribuição dos dados, diferentemente da abordagem estatística paramétrica tradicional; e a habilidade para manipular dados adquiridos de diferentes fontes e com diferentes níveis de precisão e ruídos (KEY et al., 1989).

A utilização de redes neurais para predição de classes de solos não é muito frequente na literatura mundial, mas apresentam grande potencial de aplicação para reconhecimento e generalização de padrões. Rojas (2004) relata que as redes neurais desempenham essa tarefa melhor

a relação entre a resposta e as variáveis regressoras; e a preditiva, que é capaz de identificar a reincidência da resposta de acordo com a repetição das variáveis predictoras (HOSMER; LEMESHOW, 1989; NEUMANN, 2012).

As regressões logísticas múltiplas podem ser aplicadas em casos quando o resultado da inferência pode ocorrer sob muitas categorias, e a melhor alternativa é trabalhar com a probabilidade de ocorrência de cada uma das categorias. Esse modelo permite avaliar a probabilidade de ocorrência da variável resposta a partir dos valores de variáveis independentes, sejam elas qualitativas ou quantitativas, categóricas ou contínuas (CATEN, 2008; COELHO, 2010).

As regressões logísticas múltiplas vêm sendo amplamente empregadas para predição de classes de solos (BAILEY et al., 2003; FIGUEIREDO, 2006; DEBELLA-GILO et al., 2007; CATEN, 2008; CATEN et al., 2009a; COELHO, 2010; CATEN et al., 2009b).

Bailey et al. (2003) empregaram RLM para estimativa de classes de solos na Inglaterra. Figueiredo (2006) utilizou regressão logística e variáveis topográficas para predizer a ocorrência e distribuição de classes de solo em bacias hidrográficas do Rio Grande do Sul. Caten et al. (2009b) empregaram análise de componentes principais, RLM e nove variáveis ambientais derivadas de um Modelo Digital de Terreno (MDT) para gerar um mapa de classes de solos do Município São Pedro do Sul, RS.

### ***Pesos de evidência***

A análise de pesos de evidência baseia-se em processos de correlação, integração entre mapas, formulação matemática de probabilidades e combinação de evidências (BONHAM-CARTER, 1994; BOLENEUS et al., 2001). É um método similar à regressão múltipla, que estima a variável resposta a partir das variáveis preditivas (NEUMANN, 2012).

Os pesos demonstram a medida de associação entre os pontos de treinamento e os mapas de evidências, em que é calculado um peso

para cada classe das evidências. Pesos com valores positivos indicam que há mais pontos sobre a classe do que ocorreria devido à chance; pesos de valores negativos indicam a ocorrência de poucos pontos sobre a classe; e pesos de valor zero (ou muito próximo a zero) indicam uma distribuição aleatória dos pontos em relação à classe (NEUMANN, 2012). A diferença entre os pesos é denominada Contraste (C), em que  $C = (W+) - (W-)$ . O contraste é a medida da associação espacial entre os pontos de treinamento e o tema evidência (BOLENEUS et al., 2001).

Diversos autores têm utilizado pesos de evidência integrados aos Sistemas de Informação Geográfica (SIG) para estudos em ciências naturais (MOREIRA SILVA, 1999; ASADI; HALE, 2001; BOLENEUS et al., 2001; HANSEN, 2001; MOREIRA et al., 2003).

Moreira Silva (1999) utilizou a integração de dados geológicos e geofísicos para seleção de alvos para exploração mineral de ouro no Rio das Velhas, no quadrilátero ferrífero do Brasil. Hansen (2001) utilizou o método para estimar a distribuição espacial de sítios arqueológicos em uma porção do Vale Central da Califórnia.

Em mapeamentos digitais de solo, apesar de pouco aplicada, essa técnica possui um grande potencial para a seleção das variáveis que possuem maior influência sobre o solo, as quais devem ser incluídas no modelo.

### **Árvore de decisão/classificação**

As árvores de decisão possibilitam uma representação simples do conhecimento, em razão de sua capacidade de construir classificadores para prever classes baseadas em valores de atributos de um conjunto de dados (INGARGIOLA, 1996; NEUMANN, 2012).

O método de árvore de decisão permite efetuar a classificação considerando uma regra hierárquica e binária de partição dos valores digitais de suas bandas. Segundo Ingargiola (1996), citado por Neumann (2012), as árvores são constituídas das seguintes unidades: nodos que representam os atributos; arcos intermediários provenientes

dos nodos e que recebem os valores possíveis para os atributos; folhas que representam as diferentes classes de um conjunto de treinamento.

A classificação é executada respondendo a uma série de questões sobre os atributos observados. A árvore de decisão divide cada arco intermediário em dois arcos descendentes: o arco esquerdo, quando os dados satisfazem o teste lógico; e o arco direito, quando não satisfazem. A árvore é finalizada quando os nós terminais possuírem apenas uma classe (McBRATNEY, 2003; CATEN, 2008). As árvores de decisão/classificação podem ser pensadas como um tipo de chave taxonômica múltipla automatizada (MENDONÇA-SANTOS; SANTOS, 2003). Essa técnica pode estabelecer as “regras” do modelo mental utilizado pelo pedólogo para espacializar as classes de solo na paisagem (CATEN, 2008).

Bui et al. (1999), McBratney et al. (2000), Farias (2008), Crivelenti et al. (2009) e Coelho (2010) empregaram árvores de decisão no mapeamento digital de solos.

Bui et al. (1999) empregaram árvores de decisão para mapeamento digital de solos na região de Toowoomba, Austrália, a partir de um MDE e atributos de terreno derivados. Crivelenti et al. (2009) desenvolveram metodologia para mapeamento digital de solos da folha Dois Córregos utilizando árvores de decisão com apoio de parâmetros geomorfométricos, geologia e de base de dados oriundos de levantamentos de solos existentes. Coelho (2010) testou e comparou métodos de classificação em estágio único (regressões logísticas múltiplas e Bayes) e em estágios múltiplos (árvores de decisão CART) com utilização de SIG para produção de mapas pedológicos com legenda original e simplificada.

### **Redes neurais (RNA)**

As redes neurais (RNA) tentam construir um modelo matemático que supostamente funciona de forma análoga ao cérebro humano. São compostas por um sistema de muitos elementos ou “neurônios” interligados por canais de comunicação ou “conectores” que