



Revista Brasileira de Ciência do Solo

ISSN: 0100-0683

revista@sbcs.org.br

Sociedade Brasileira de Ciência do Solo
Brasil

Teske, Rodrigo; Giasson, Elvio; Bagatini, Tatiane
PRODUÇÃO DE UM MAPA PEDOLÓGICO ASSOCIANDO TÉCNICAS COMUNS AOS
MAPEAMENTOS DIGITAIS DE SOLOS COM DELINEAMENTO MANUAL DE
UNIDADES DE MAPEAMENTO
Revista Brasileira de Ciência do Solo, vol. 39, núm. 4, 2015, pp. 950-959
Sociedade Brasileira de Ciência do Solo
Viçosa, Brasil

Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=180241055003>

- Como citar este artigo
- Número completo
- Mais artigos
- Home da revista no Redalyc

redalyc.org

Sistema de Informação Científica
Rede de Revistas Científicas da América Latina, Caribe, Espanha e Portugal
Projeto acadêmico sem fins lucrativos desenvolvido no âmbito da iniciativa Acesso Aberto

Comissão 1.3 - Pedometria

PRODUÇÃO DE UM MAPA PEDOLÓGICO ASSOCIANDO TÉCNICAS COMUNS AOS MAPEAMENTOS DIGITAIS DE SOLOS COM DELINEAMENTO MANUAL DE UNIDADES DE MAPEAMENTO

Rodrigo Teske⁽¹⁾, Elvio Giasson^{(2)*} e Tatiane Bagatini⁽¹⁾

⁽¹⁾ Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Faculdade de Agronomia, Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.

⁽²⁾ Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Faculdade de Agronomia, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.

* Autor correspondente.

E-mail: giasson@ufrgs.br

RESUMO

A produção de mapas pedológicos por meio de técnicas do mapeamento digital de solos (MDS) pode ser dificultada pela falta de mapas pedológicos tradicionais de referência. Nessas situações, o conhecimento tácito do mapeador pode ser usado para o delineamento manual das unidades de mapeamento (UMs) a partir de geração de um mapa de ocorrência de tipos de solos preditos pelo MDS. Os objetivos deste estudo foram avaliar e comparar mapas de solos gerados por dois métodos, um denominado “MDS direto”, em que foi gerado um mapa preditor de UMs com base no modelo estabelecido com informações provenientes de um mapa pedológico convencional de referência preexistente, e outro em que o modelo preditor foi estabelecido a partir do exame de atributos morfológicos de 193 perfis de solo para identificar os tipos de solos, gerando-se um mapa com a indicação de ocorrência de tipos de solos sobre o qual foi realizado o delineamento manual das UMs, com base em mudanças das feições da superfície do solo. As predições foram feitas usando árvores de classificação *Simple Cart*, correlacionando oito variáveis do terreno com a ocorrência de UMs identificadas com nomes de classes de solos do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. A acurácia dos mapas foi avaliada pela “verdade de campo” (verificação em campo do tipo de solo ocorrente e comparação com o previsto no mapa) e pela concordância dos mapas gerados com o mapa de referência. Quando avaliado pela “verdade de campo”, a acurácia do mapa gerado pelo método MDS direto foi de 74 %, enquanto a acurácia do mapa de MDS com delineamento manual foi de 79 %. Os dois métodos apresentaram resultados satisfatórios; o método que usou o delineamento manual e a identificação em alguns locais dos tipos de solo

Recebido para publicação em 16 de maio de 2014 e aprovado em 13 de abril de 2015.

DOI: 10.1590/01000683rbc20140285

no campo apresentou a vantagem de não necessitar de mapas pedológicos de referência para o treinamento dos modelos preditores.

Palavras-chave: mapas de solos, levantamentos pedológicos, tipos de solo, árvores de decisão, perfis de solo.

ABSTRACT: PRODUCTION OF A SOIL MAP ASSOCIATING COMMON DIGITAL SOIL MAPPING TECHNIQUES WITH HAND DELINEATION OF SOIL MAPPING UNITS

The production of soil maps through digital soil mapping (DSM) techniques may be hampered due to the lack of traditional reference soil maps. In these situations, the tacit knowledge of the field soil scientist can be used for manual delineation of soil mapping units (MUs) based on generation of a map of occurrence of soil types predicted by DSM. The objective of this study was to evaluate and to compare soil maps generated by two methods. One method, called "direct DSM", generates a map predicting soil MUs based on a model established with information from a traditional pedological reference map. The other established a predicting model through examination of morphological properties of 193 soil profiles for identification of soil types, generating a map that indicates the occurrence of soil types performed through manual delineation of MUs (based on changes in land surface features). Predictions were made using Simple Cart classification trees, correlating eight terrain variables with the occurrence of MUs identified by soil class names from the Brazilian Soil Classification System (Sistema Brasileiro de Classificação de Solos). The accuracy of the maps was evaluated based on "field truth" (field verification of the soil type and comparison with that predicted on the map) and by agreement between the prediction maps generated and the reference map. When evaluated by "field truth", the accuracy of the map generated by the direct DSM method was 74 %, whereas the accuracy of the map generated by DSM with manual delineation was 79 %. Both methods showed satisfactory results, and the method with manual delineation and identification of soil types in some locations in the field had the advantage of not requiring reference soil maps for training prediction models.

Keywords: soil maps, soil surveys, soil types, decision tree, soil profiles.

INTRODUÇÃO

Os levantamentos pedológicos são importante fonte de informações sobre a distribuição e caracterização dos solos, e a maioria é elaborada a partir da observação dos solos no campo e do estabelecimento de relações entre esses e as características da paisagem. Os levantamentos pedológicos convencionais efetuados pelo método sintético ou *free survey* (Rossiter, 2000) são a forma mais comum de mapeamento de solos e, em muitos casos, a única maneira pela qual as relações solo-paisagem são documentadas (Scull et al., 2005). Nos mapeamentos convencionais, frequentemente as relações solo-paisagem são estabelecidas a partir de interpretações de fotografias aéreas e de informações ambientais associadas ao conhecimento teórico e à experiência prática do mapeador (Hengl et al., 2007). A representação cartográfica dessas relações é primeiro feita pelo delineamento das unidades de mapeamento de solos (UMs) (Bui, 2004). Essas UMs podem ser simples, com dominância de apenas um tipo de solo, ou combinadas, com dois ou mais componentes sob a forma de associações, complexos ou grupos indiferenciados (IBGE, 2007).

Semelhantemente aos mapeamentos convencionais de solos efetuados pelo método de mapeamento livre

(*free survey*, descrito por Rossiter, 2000), as técnicas do mapeamento digital de solos (MDS) consistem em estabelecer as relações entre os perfis de solos e as feições da paisagem; porém, isso é feito de forma mais quantitativa que nos mapas tradicionais. Para isso, utilizam-se modelos numéricos ou estatísticos para inferir as variações espaciais dos solos, a partir de mapas já existentes, de observações em campo ou de variáveis ambientais correlacionadas (Lagacherie e McBratney, 2007; Shi et al., 2009). O modelo conceitual usado no mapeamento digital de solos pode ser descrito da seguinte forma (adaptado de McBratney et al., 2003):

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

em que St é o tipo de solo, f é uma função empírica supervisionada ou não; s refere-se a informações sobre o solo a partir de um mapa preexistente, banco de dados ou a partir de um conhecimento especializado; c relaciona-se ao clima; o , refere-se a organismos, incluindo a atividade humana; r refere-se ao relevo; p relaciona-se ao material de origem; a refere-se à idade; e n refere-se a posição espacial. Cada elemento é representado por um conjunto de uma ou mais variáveis contínuas ou divididas em categorias, por exemplo, r pode ser representada por elevação e declividade (Minasny e McBratney, 2007).

As técnicas preditivas totalmente diretas usadas no MDS podem não ser as mais adequadas quando usadas sem um controle da predição e de ajustes necessários realizados por pessoa com experiência no mapeamento de solos, de forma a controlar o processo de produção do mapa final (Hengl et al., 2007). Dessa forma, a incorporação do conhecimento tácito do mapeador de solos aos modelos preditivos, citada como conhecimento especialista ou *expert knowledge*, como chamado por Scull et al. (2005), pode contribuir para a geração de modelos e mapas preditores de solo mais acurados.

A capacidade da predição de ocorrência de solos por métodos diretos de MDS, em que a partir de mapas de solos preexistentes os modelos são estabelecidos e geram diretamente um mapa digital de solos, pode também ficar limitada quando as UMs forem do tipo combinadas ou quando a paisagem apresentar elevada variabilidade de tipos de solos. Isso pode ocorrer porque, nesse caso, dentro das UMs delineadas nos mapas de referência, além da complexa distribuição espacial dos solos, podem ocorrer muitas variações ambientais que prejudicam a capacidade preditiva dos modelos. Ademais, esse tipo de procedimento de MDS, com base no treinamento de modelos a partir de um mapa de referência, pode se tornar inviável na falta de mapas de solos preexistentes. Dessa forma, a predição de ocorrência de tipos de solos por modelos estabelecidos a partir de observações gerais sobre morfologia de perfis de solos georreferenciados pode ser uma alternativa para a geração de mapas digitais de solos, embora também possa ser limitante quando essas informações não estão disponíveis. Nesses casos, o modelo prediz a ocorrência de tipos de solos em determinados locais na paisagem e, sobre um mapa com essas informações, o mapeador de solos pode usar seu conhecimento especializado e experiência para gerar um mapa de solos delineando as UMs simples ou combinadas, conforme a distribuição espacial dos tipos de solos indicada pelo modelo preditor. A acurácia dos mapas gerados pode ser avaliada pela verdade de campo, que é a verificação no campo do tipo de solo ocorrente e sua comparação com o previsto pelo mapa de solos.

Os objetivos deste estudo foram avaliar e comparar dois métodos de mapeamento digital de solos (MDS), direto e com delineamento manual de unidades de mapeamento de solos (UMs), para a predição de ocorrência de solos em uma bacia hidrográfica no Estado do Rio Grande do Sul.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado na bacia do Rio Santo Cristo, situada na região do Alto Uruguai no Estado do Rio Grande do Sul (Figura 1a), com uma área de 898 km²

abrangendo sete municípios. O clima, segundo Köppen, é subtropical úmido (Cfa) com chuvas regulares durante todo o ano e precipitação pluvial média anual de 1.778 mm, com temperatura média anual de 18,5 °C. Os solos da região são formados a partir de rochas magmáticas básicas da Formação Serra Geral (Nardy et al., 2008). O relevo é de um planalto profundamente recortado pelos afluentes do Rio Uruguai, sendo suave ondulado nas proximidades das nascentes dos Rios Santo Cristo e Tuparendi e mais acidentado em direção ao Rio Uruguai onde tem vales profundos e encostas íngremes. Como o material de origem e o clima podem ser considerados uniformes nessa bacia, o relevo foi considerado o fator com maior potencial para explicar as variações de ocorrência de solos na área.

Em ambiente de sistemas de informações geográficas (SIG) e utilizando o programa ArcGis 9.3 (ESRI, 2009), foram geradas oito variáveis ambientais preditoras da ocorrência de tipos de solos, das quais, a elevação, a declividade, a direção do fluxo, o acúmulo de fluxo, o comprimento do fluxo, o índice de umidade topográfica e a curvatura foram geradas a partir do modelo digital de elevação (MDE) ASTER GDEM v.2 com tamanho de *pixel* de 30 m (Meyer et al., 2012), e a distância de cursos d'água mais próximos foi gerada a partir do arquivo vetorizado da hidrografia disponível em Hasenack e Weber (2010). Essas variáveis foram selecionadas por serem derivadas do MDE e por terem demonstrado em muitos estudos serem as que mais condicionam a distribuição espacial dos tipos de solos.

A partir (a) da correlação entre variáveis do terreno e unidades de mapeamento de solos (UMs) de solos representados em um mapa pedológico preexistente (Kämpf et al., 2004) ou (b) de tipos de solos identificados em locais onde foi examinada a morfologia de seus perfis, foram gerados mapas usando dois métodos de predição da distribuição espacial dos solos. O primeiro método (MDS direto) consistiu na geração de um mapa preditor de UMs, cujo modelo foi treinado com informações provenientes de um mapa convencional de solo na escala 1:50.000 (Kämpf et al., 2004) (Figura 1b). Nesse método, o estabelecimento do modelo preditor foi realizado a partir de uma amostragem em 45.000 pontos distribuídos aleatoriamente sobre os mapas de solos e sobre os mapas das variáveis preditoras usadas na predição das UMs de solo. Em cada ponto localizado no mapa, foram coletados os dados das oito variáveis preditoras das UMs indicadas na legenda do mapa de solos convencional. Os dados tabulados foram exportados para estabelecimento do algoritmo de árvore de classificação *Simple Cart* no programa de mineração de dados *Weka* 3.6.3 (Hall et al., 2009). As regras de classificação resultantes foram implementadas no programa ArcGis 9.3 (ESRI, 2009), obtendo-se, assim, o mapa de predição de ocorrência das UMs.

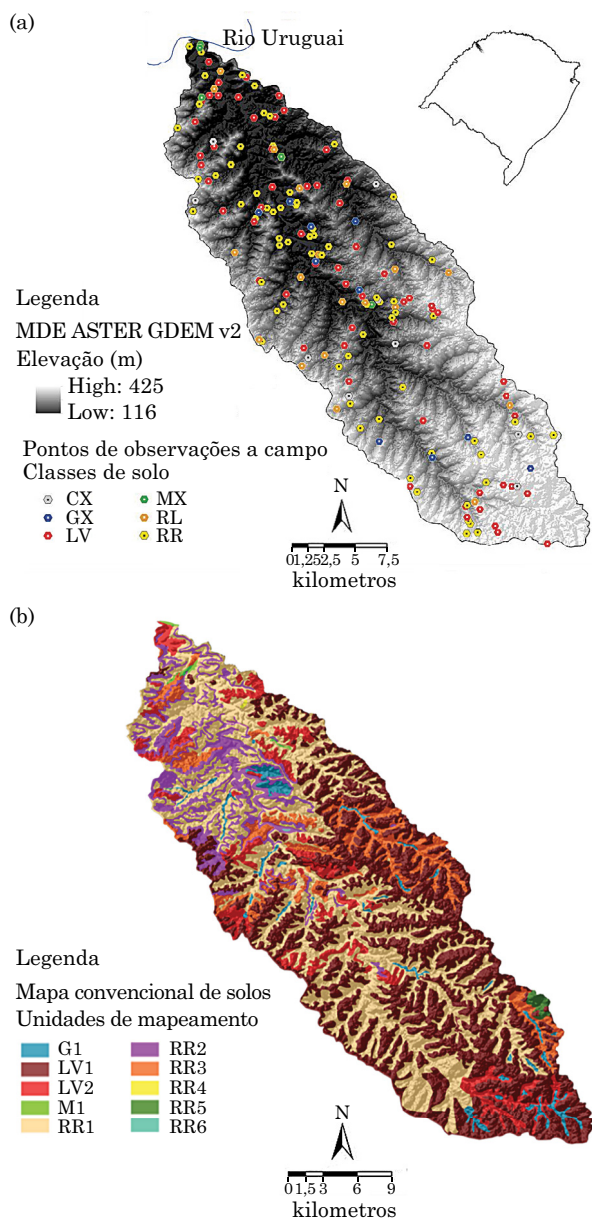


Figura 1. (a) Modelo digital de elevação ASTER GDEM v2 com a distribuição espacial dos locais em que os perfis de solo foram examinados, sendo CX: Cambissolo Háplico, GX: Gleissolo Háplico, LV: Latossolo Vermelho, MX: Chernossolo Háplico, RL: Neossolo Litólico, RR: Neossolo Regolítico; e (b) Mapa convencional de solos da bacia do Rio Santo Cristo (Kämpf et al., 2004).

O segundo método (MDS com delineamento manual) consistiu em estabelecer o modelo preditor para gerar um mapa de tipos de solo para toda a extensão da bacia com base em 193 perfis de solos descritos por ocasião da realização do levantamento convencional de solos e cuja distribuição espacial encontra-se na figura 1a. Nesses perfis observados em taludes de barrancos ou em tradagens, foram

observados atributos morfológicos internos (como sequência e tipos horizontes) e externos (como posição na catena) de fácil reconhecimento e correlacionados com as características diagnósticas, tendo sido usados para identificar os tipos de solo e mesmo a provável classe taxonômica, em campo. Nos pontos de prospeção em campo, ocorreram na área vários tipos de solos identificados pelas suas características morfológicas diferenciais em campo como pertencentes a seis subordens do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos - SiBCS (Santos et al., 2013): 14 Cambissolos Háplicos, 13 Gleissolos Háplicos, 64 Latossolos Vermelhos, oito Chernossolos Háplicos, 19 Neossolos Litólicos e 75 Neossolos Regolíticos. As combinações de ocorrência dos tipos de solos com as variáveis preditoras foram usadas para o estabelecimento do modelo preditor de tipos de solo. Os dados foram tabulados e exportados para estabelecer o algoritmo de árvores de classificação *Simple Cart* no programa de mineração de dados *Weka 3.6.3* (Hall et al., 2009), que correlacionou as variáveis preditoras com os tipos de solo ocorrentes. Com o uso das regras de classificação geradas, foi produzido no programa *ArcGis 9.3* (ESRI, 2009) o mapa de predição de ocorrência de tipos de solo (Figura 2b). Sobre esse mapa sobreposto ao mapa com relevo sombreado, foi realizado o delineamento manual das UMs, identificando-se as UMs de acordo com dominância de um ou mais tipos de solos como UMs simples ou combinadas. Separaram-se como UMs simples as aglutinações de tipos de solos que ocorressem em extensão maior que a área mínima mapeável para a escala de trabalho, ou como UMs combinadas quando ocorreram diversos tipos de solo dispostos em pequenas extensões de área justapostas. A fim de compatibilizar a comparação entre os mapas preditores de UMs, foi utilizada a mesma legenda (Quadro 1) do mapa de solos convencional preexistente.

As concordâncias dos mapas gerados com o mapa de referência foram avaliadas pelas suas comparações com o mapa convencional de solos, gerando-se matrizes de erros (Congalton, 1991) e calculando-se a concordância geral, a acurácia do mapeador, os erros de omissão e o índice Kappa (Cohen, 1960). As acurácias do mapa convencional de solos, do mapa de predição de tipos de solos e dos mapas finais gerados pelos dois métodos de predição foram avaliadas pela verdade de campo, que consistiu na comparação dos mapas com os tipos de solos identificados nos 193 locais onde a identificação da classificação dos solos no nível de subordens foi realizada.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A avaliação do mapa convencional de solos pela “verdade de campo” resultou em uma acurácia geral de 80 % (Quadro 2). As UMs que ocorrem em áreas mais extensas LV1, LV2, RR1 e RR3

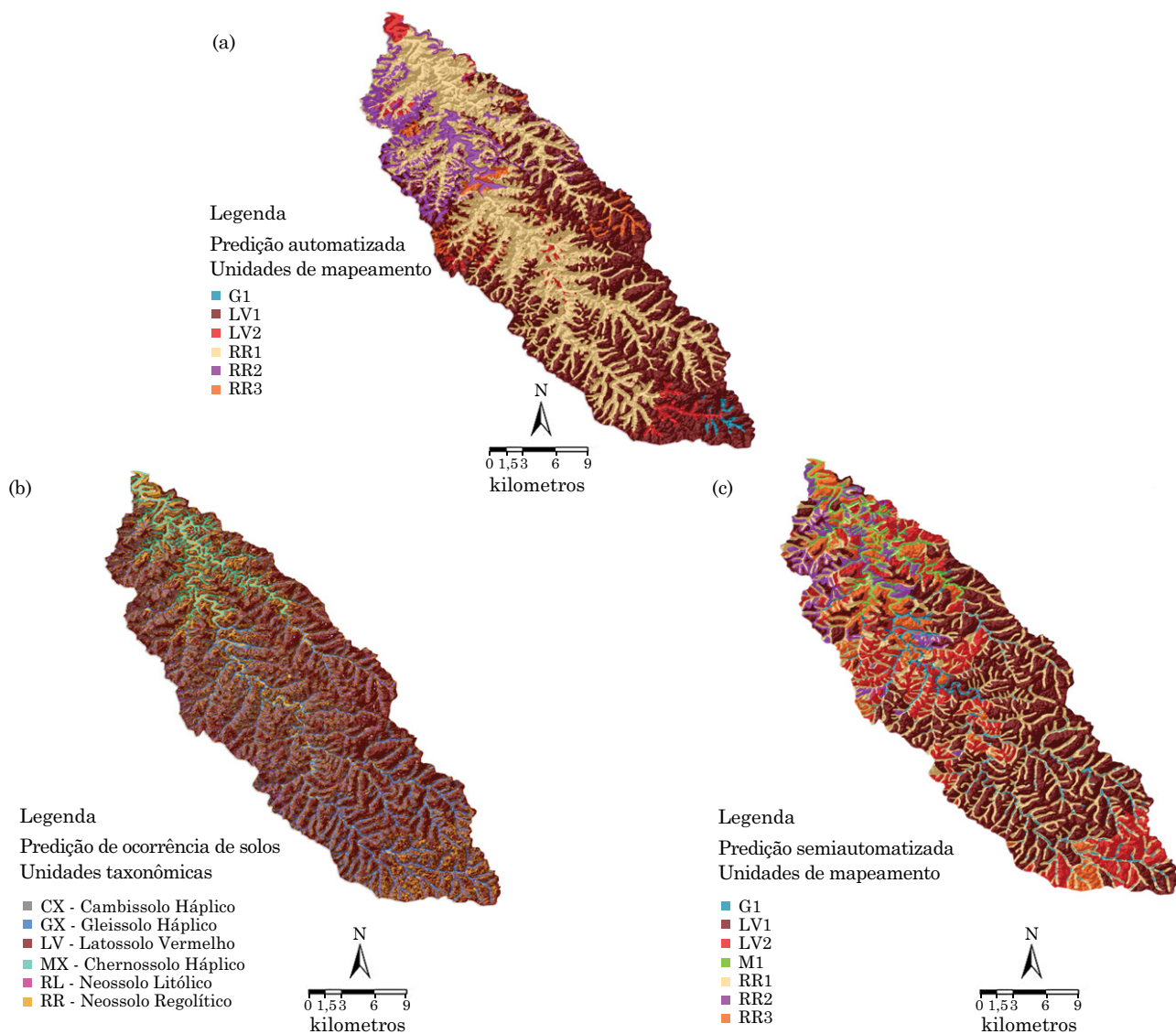


Figura 2. Mapa de unidades de mapeamento de solos gerado pelo método MDS direto (a); mapa intermediário de tipos de solos (b); e mapa de predição de ocorrência de unidades de mapeamento de solos delineadas a partir do mapa de predição de tipos de solo (método MDS com delineamento manual) (c).

apresentaram as maiores porcentagens de acertos com valores iguais ou maiores que 79 %, sendo as UMs LV1 e LV2 as mais acuradas. Essas duas UMs evidenciam, principalmente, a distribuição de solos classificados como Latossolos Vermelhos que ocorrem em extensas e contínuas áreas da bacia, em cujo relevo ocorrem menores variações de inclinação das encostas do que nas áreas de ocorrência das UMs RR1, RR2 e RR3, que apresentam como principais componentes os solos menos desenvolvidos da bacia identificados taxonomicamente como Cambissolos, Neossolos Regolíticos e Neossolos Litólicos. Nas demais UMs (RR2, M1 e G1) foram encontradas menores porcentagens de acertos, porém com valor igual ou maior que 50 %.

O mapa gerado pelo método MDS direto (Figura 2a) estimou seis UMs (G1, LV1, LV2, RR1, RR2 e RR3) com uma acurácia geral de 74 % avaliada pela verdade de campo (Quadro 2). A UM mais extensa (LV1) foi predita em áreas com relevo plano a suave ondulado apresentando a segunda maior acurácia, com 93 % de acertos. Nas áreas com relevo ondulado a forte ondulado foram preditas as UMs RR1, RR2 e RR3. A predição da segunda UM mais extensa (RR1) foi generalizada por diversas regiões da bacia, ocupando desde áreas de encosta até o fundo dos vales encaixados, onde dominam os processos erosionais, e apresentou acurácia de 62 %. A concordância do mapa de predição direta de UMs com o mapa convencional de solos foi de 63 %, com índice Kappa de 0,43

Quadro 1. Unidades de mapeamento de solos (UMs), nomes taxonômicos, proporções dos componentes, inclusões e percentual de área na bacia do Rio Santo Cristo, RS

Nome da UM ⁽¹⁾	Nome taxonômico ⁽²⁾	Proporção do componente	Inclusão ⁽³⁾	Área
				%
G1	Gleissolo Háplico	-		2,5
LV1	Latossolo Vermelho distroférrico	-	RR, CX	38,3
LV2	Associação Latossolo Vermelho + Neossolo Regolítico	60 e 40	CX	7,9
M1	Chernossolo Háplico	-	CX	0,2
RR1	Associação Neossolo Regolítico + Cambissolo Háplico	60 e 40	RL, CX	34,8
RR2	Complexo Neossolo Regolítico + Neossolo Litólico	50 e 50	CX	8,1
RR3	Associação Neossolo Regolítico + Latossolo Vermelho	60 e 40	CX	7,9
RR4	Associação Neossolo Regolítico + Neossolo Litólico	70 e 30		0,03
RR5	Associação Neossolo Regolítico + Cambissolo Háplico + Latossolo Vermelho	50, 30 e 20		0,4
RR6	Associação Neossolo Regolítico + Chernossolo Háplico	60 e 40	CX	0,01

⁽¹⁾ De acordo com Kämpf et al. (2004); ⁽²⁾ Conforme (Santos et al., 2013); ⁽³⁾ RR: Neossolo Regolítico; CX: Cambissolo Háplico; e RL: Neossolo Litólico.

Quadro 2. Avaliação da acurácia pela “verdade de campo” no mapa de solos convencional, no mapa preditor de tipos de solo e nos mapas preditores de unidades de mapeamento (UMs) gerado por dois métodos de mapeamento, direto e com delineamento manual

UMs ⁽¹⁾	Mapa convencional	Mapa preditor		Unidade de solo ⁽³⁾	Mapa preditor de unidades de solo
		MDS direto	MDS com delineamento manual		
		acertos %			acertos %
G1	50	-	71	CX	16
LV1	87	93	90	GX	55
LV2	84	67	92	LV	61
M1	67	-	80	MX	80
RR1	79	62	78	RL	57
RR2	67	100	50	RR	66
RR3	83	-	87	-	-
RR4	-	-	-	-	-
RR5	-	-	-	-	-
RR6	-	-	-	-	-
AG (%) ⁽²⁾	80	74	79	-	55

⁽¹⁾ G1: Gleissolo Háplico; LV1: Latossolo Vermelho distroférrico; LV2: Associação Latossolo Vermelho + Neossolo Regolítico; M1: Chernossolo Háplico; RR1: Associação Neossolo Regolítico + Cambissolo Háplico; RR2: Complexo Neossolo Regolítico + Neossolo Litólico; RR3: Associação Neossolo Regolítico + Latossolo Vermelho; RR4: Associação Neossolo Regolítico + Neossolo Litólico; RR5: Associação Neossolo Regolítico + Cambissolo Háplico + Latossolo Vermelho; e RR6: Associação Neossolo Regolítico + Chernossolo Háplico; ⁽²⁾ AG: acurácia geral; ⁽³⁾ CX: Cambissolo Háplico; GX: Gleissolo Háplico; LV: Latossolo Vermelho; MX: Chernossolo Háplico; RL: Neossolo Litólico; RR: Neossolo Regolítico.

(Quadro 3). Esses resultados são similares aos obtidos por Giasson et al. (2011), que encontraram valores de concordância geral entre 52 e 72 % e índice Kappa de 0,328 e 0,575. No mapa gerado com MDS direto, as UMs LV1 e RR1 permaneceram como as UMs mais extensas ocupando 43,9 e de 39,1 % do total da bacia (Quadro 3) e foram preditas de forma semelhante ao mapa convencional, resultando nos maiores valores de acurácia do mapeador. Em relação às áreas ocupadas por essas UMs no mapa convencional, 81 % foram igualmente classificadas no mapa preditor como a UM

LV1, e 69 % foram corretamente identificados com solos classificados como RR1 (Quadro 3). Os erros de identificação do solo ocorreram em geral pela mútua confusão da predição das UMs LV1 e RR1 e podem estar relacionados ao fato de as áreas de ocorrência dessas UMs no mapa convencional serem adjacentes em praticamente toda a bacia.

Para obter o mapa contendo as UMs delineadas manualmente, foi gerado primeiramente e como produto intermediário um mapa de predição

de ocorrência de áreas onde dominam pedons idênticos correspondentes a determinado tipo de solo (Figura 2b). Nesse mapa intermediário de tipos de solos, a distribuição espacial dos Latossolos Vermelhos foi predita com sucesso para as áreas com altitudes superiores a 239 m, ocupando extensas áreas de relevo suave ondulado a ondulado. O solo identificado como Neossolo Regolítico foi predito em áreas do sudeste da bacia com relevo ondulado e nas outras regiões da bacia ocupando preferencialmente os terços inferiores de encosta com declividade maior que 20 %. A predição do solo identificado como Neossolo Litólico na porção mais a noroeste da bacia ocorreu nas áreas mais altas (acima de 170 m) com relevo fortemente ondulado a montanhoso, e nas demais regiões foi predita desde as áreas mais altas, passando pelas posições de terço médio das encostas até o fundo dos vales encaixados. A maior parte da predição de solos identificados como Cambissolos foi distribuída nas áreas com relevo mais acidentado da bacia, geralmente acompanhando a ocorrência do solo Neossolo Regolítico e Neossolo Litólico, formando um mosaico com variadas proporções desses três tipos de solo, principalmente nas áreas de encostas mais declivosas. Nas áreas de fundo de vales amplos com relevo plano e dominância de processos deposicionais, foram preditas a ocorrência de Gleissolo Háplico, nas porções central e sudeste da bacia, e de Chernossolos Háplicos, na região noroeste da bacia. A predição dos seis tipos de solo encontrados nas observações em campo resultou em distribuição espacial desses solos com uma acurácia avaliada pela verdade de campo de 55 % (Quadro 2). Com exceção dos Cambissolos, a porcentagem de acertos na predição dos tipos de solo variou de 55 a 80 %, valores esses que são semelhantes aos encontrados por Bui e Moran (2003), em diversas combinações de complexidade de solos, clima e geologia na Austrália, e por Minasny e McBratney (2007), usando classificação supervisionada e conceito de distância taxonômica, cujos percentuais de predição correta de cada tipo de solo variou entre 50 e 80 %. Em estudo de predição de tipos de solo por árvore de classificação e um algoritmo genérico, Nelson e Odeh (2009), utilizando informações taxonômicas de 3.875 perfis de solo, encontraram valores de índice Kappa entre 0,07 e 0,37 e acurácia com 10 a 53 % de acertos de classificação. Em estudo de Adhikari et al. (2014), utilizando 1.171 perfis de solo como informação pedológica de referência, a predição de tipos de solos por árvore de decisão resultou valores de acurácia de 51,0 a 60,0 % na validação do modelo. Ao validar mapas de predição de tipos de solo no Iran, utilizando 4.250 perfis de solos, Hengl et al. (2007) encontraram valor máximo de classificações corretas de 36,7 %. Roecker et al. (2010) encontraram acurácia geral de 49,0 % ao predizer a ocorrência de subgrupos de solos no Deserto de Mojave, na Califórnia, usando 62 perfis de solos para o estabelecimento de modelos preditores.

Os mapas de predição de ocorrência de áreas onde predominam solos identificados como pertencentes a um só tipo, gerados a partir do estabelecimento de modelos preditores usando as informações dos perfis de solos (Figura 2b), evidenciam a variação de ocorrência dos tipos de solos na paisagem de forma detalhada, porém a distribuição espacial dos diversos tipos de solos é cartograficamente inadequada e pouco legível, o que pode dificultar a interpretação da ocorrência dos solos de dada região em razão da grande variabilidade espacial (Roecker et al., 2010). Assim, esse mapa de distribuição de solos foi redesenhado por meio do delineamento manual de UMs de solos, quando necessário criando UMs combinadas.

No mapa gerado pelo delineamento manual de UMs, foram obtidas sete UMs (Figura 2c). A UM LV1 foi delimitada, principalmente em cotas altimétricas acima de 240 m e em áreas com relevo plano a ondulado, ocupando extensas áreas desde o sudeste da bacia até áreas próximas da porção central. Os maiores delineamentos da UM LV2 foram realizados ao sudeste e na porção central e, em menor proporção, em áreas situadas ao noroeste da bacia. Essas UMs (LV1 e LV2) foram delineadas, em sua maioria, nas áreas da bacia com relevo mais suave e que favorecem os processos de percolação de água no perfil e a formação de solos mais espessos, como os Latossolos Vermelhos presentes em ambas as legendas. As UMs RR1, RR2 e RR3 foram delineadas nas áreas mais íngremes da bacia e, geralmente, ocupando os terços médios e inferiores de encostas até o fundo de vales encaixados e erosionais, e com menor expressividade nas áreas de topo dos morros. As UMs simples (G1 e M1) foram delineadas nos fundos dos vales amplos e planos, onde foi predita a ocorrência de Gleissolos Háplicos e Chernossolos Háplicos.

A avaliação da verdade de campo no mapa gerado pelo delineamento manual de UMs resultou uma acurácia geral de 79 % (Quadro 2). Esse valor foi muito semelhante ao encontrado no mapa de solos convencional (80 %) e levemente superior ao mapa gerado pelo método MDS direto (74 %). Os resultados da “verdade de campo” demonstraram que o mapa com delineamento manual de UMs apresentou porcentagens de acertos iguais ou maiores a 50 % para todas as UMs e possibilitou delimitar as UMs G1, LV1, LV2, M1, RR1 e RR3 com acurácia igual ou maior do que no mapa de solos convencional. Portanto, além das UMs mais representativas da bacia do Rio Santo Cristo, que também foram preditas pelo método MDS direto, esse método possibilitou delinear duas das UMs menos extensas da bacia, as UMs simples G1 e M1, com respectivas acurácias de 71 e 80 %. Isso pode ser considerado vantajoso, pois a reprodutibilidade de UMs menos extensas pelos modelos preditores diretos é uma dificuldade comumente encontrada e relatada em diversos trabalhos de MDS (Giasson et al., 2011; Ten Caten et al., 2011).

Quadro 3. Matriz de erros comparando o mapa convencional de solos e o mapa de predição de ocorrência de unidades de mapeamento (UMs) gerado pelo método do mapeamento digital de solos (MDS) direto e com delineamento manual

UMs ⁽¹⁾	UMs										Total	Área
	G1	LV1	LV2	M1	RR1	RR2	RR3	RR4	RR5	RR6		
											%	
	MDS direto											
G1	0,4	0,1	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7	0,7
LV1	0,5	31,0	2,7	0,0	6,4	0,7	2,3	0,0	0,3	0,0	43,9	43,9
LV2	0,3	0,5	1,6	0,0	0,7	0,2	0,1	0,0	0,0	0,0	3,4	3,4
M1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
RR1	1,0	5,4	2,7	0,2	24,1	3,3	2,3	0,0	0,1	0,0	39,1	39,1
RR2	0,1	0,6	0,5	0,0	2,4	3,7	0,7	0,0	0,0	0,0	8,0	8,0
RR3	0,1	0,7	0,2	0,0	1,2	0,2	2,5	0,0	0,0	0,0	4,9	4,9
RR4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
RR5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
RR6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Total	2,4	38,3	7,9	0,2	34,8	8,1	7,9	0,0	0,4	0,0	100	100
AM (%) ⁽²⁾	18	81	20	0	69	46	32	0	0	0		
AG (%) ⁽³⁾	63											
Kappa	0,46											
	MDS com delineamento manual											
G1	0,5	0,3	0,3	0,0	2,0	0,3	0,5	0,0	0,0	0,0	3,9	3,9
LV1	0,3	24,7	1,6	0,0	9,3	1,5	2,4	0,0	0,3	0,0	40,1	40,1
LV2	0,2	7,0	2,3	0,0	3,8	0,8	1,0	0,0	0,0	0,0	15,1	15,1
M1	0,1	0,0	0,2	0,1	2,0	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0	3,2	3,2
RR1	0,9	4,4	1,9	0,0	12,4	2,0	2,8	0,0	0,1	0,0	24,3	24,3
RR2	0,2	0,2	0,6	0,0	1,7	1,2	0,6	0,0	0,0	0,0	4,6	4,6
RR3	0,2	1,8	0,9	0,1	3,6	1,5	0,6	0,0	0,0	0,0	8,7	8,7
RR4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
RR5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
RR6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Total	2,4	38,3	7,9	0,2	34,8	8,1	7,9	0,0	0,4	0,0	100	100
AM (%) ⁽²⁾	21	64	29	41	36	14	7	0	0	0		
AG (%) ⁽³⁾	42											
Kappa	0,2											

⁽¹⁾ G1: Gleissolo Háplico; LV1: Latossolo Vermelho distroférrico; LV2: Associação Latossolo Vermelho + Neossolo Regolítico; M1: Chernossolo Háplico; RR1: Associação Neossolo Regolítico + Cambissolo Háplico; RR2: Complexo Neossolo Regolítico + Neossolo Litólico; RR3: Associação Neossolo Regolítico + Latossolo Vermelho; RR4: Associação Neossolo Regolítico + Neossolo Litólico; RR5: Associação Neossolo Regolítico + Cambissolo Háplico + Latossolo Vermelho; e RR6: Associação Neossolo Regolítico + Chernossolo Háplico; ⁽²⁾ AM: acurácia do mapeador; ⁽³⁾ AG: acurácia geral.

A comparação do mapa gerado por MDS com delineamento manual de UMs com o mapa convencional apresentou uma concordância de 42 % (Quadro 3). Os maiores valores de acurácia do mapeador foram encontrados na UM LV1 com 64 %, seguido da M1 com 41 % e da RR1 com 36 %. Tanto no mapa de referência como no com as UMs delineadas manualmente, as UMs LV1 e RR1 foram as mais extensas, embora apresentem diferentes percentuais de área ocupada em cada mapa. A

UM LV1 foi delineada de forma concordante em 64 % com o mapa convencional de solos. A UM RR1 apresentou uma concordância de 36 % com o mapa convencional de solos; da área ocupada pela RR1 no mapa convencional, 26,7 % foram delineadas como LV1; 10,9 % como LV2; e 10,3 % como RR3. Assim como no mapa gerado pela predição direta de UMs, as confusões de classificação entre as UMs mais extensas da bacia (LV1 e RR1) estão relacionadas ao fato de essas UMs serem adjacentes em praticamente

todas as regiões da bacia e que entre essas UMs ocorre uma área de transição que confunde sua separação, dado que a sua diferenciação é feita com base na proporção de ocorrência dos Neossolos Regolíticos, que ocorrem como inclusões na UM LV1 e como tipo de solo associado na UM RR1.

Com base nos resultados encontrados, observou-se que o mapa de predição direta de UMs apresentou concordância maior com mapa convencional de solos (63 %) do que o mapa com delineamento manual de UMs (42 %). Porém, a avaliação da acurácia pela “verdade de campo” indicou que a integração do delineamento manual na geração do mapa de solos resultou um mapa mais acurado (acurácia de 79 %) do que o mapa gerado pelo método MDS direto (acurácia de 74 %) e quase tão acurado quanto o mapa convencional de solos (acurácia de 80 %). Entre os poucos estudos comparando a acurácia de mapas gerados pelas técnicas do MDS e convencionais, Skidmore et al. (1996) encontraram acurácia de 74 % no mapa convencional e de 70 % no mapa gerado com classificador supervisionado Bayesiano. Zhu et al. (2001) relataram resultados concordantes com os encontrados neste estudo, em que os mapas de solos produzidos pelo levantamento convencional de solos foram menos acurados (61 e 67 % de acerto) do que os mapas de solos produzidos pelo modelo de inferência de relações solo-paisagem supervisionado pelo pedólogo (81 e 84 % de acerto).

Este estudo demonstrou que, com a adição do delineamento manual de UMs às técnicas quantitativas de predição de tipos de solo, foi possível gerar mapas de solos tão acurados quanto o mapa convencional de solos, com vantagem em relação ao método de predição direta de UMs por possibilitar a geração de mapa digital de solos sem a necessidade de mapas pedológicos de referência para o treinamento de modelos preditores. Todavia, deve-se considerar que esse método ainda apresenta a necessidade de dispor-se de locais onde os tipos de solos sejam conhecidos, o que pode eventualmente ser trabalhoso, dependendo dos tipos de solos ocorrentes na área e da maior ou menor facilidade de discriminação entre eles no campo.

CONCLUSÕES

O mapa de predição de ocorrência de unidades de mapeamento de solo gerado pelo método do mapeamento digital (MDS) de solo direto apresentou maior concordância com o mapa convencional de solos do que o mapa predito pelo método MDS com delineamento manual.

O mapa de unidades de mapeamento de solo gerado com o delineamento manual das unidades de mapeamento evidenciou a maior acurácia avaliada pela “verdade de campo”.

A associação do delineamento manual de unidades de mapeamento de solos às técnicas do mapeamento digital de solos demonstrou-se útil para uso em situações onde inexistem mapas pedológicos de referência para serem usados no estabelecimento de modelos preditores, embora necessitem de informações da ocorrência dos diversos tipos de solos.

AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa de Doutorado para o primeiro autor. Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela bolsa de Produtividade em Pesquisa concedida para o segundo autor e pela bolsa de Doutorado concedida para a terceira autora. Ao Dr. Alberto Vasconcellos Inda Junior, pela colaboração na revisão final deste artigo.

REFERÊNCIAS

- Adhikari K, Minasny B, Greve MB, Greve MH. Constructing a soil class map of Denmark based on the FAO legend using digital techniques. *Geoderma*. 2014;214-215:101-13.
- Bui EN, Moran CJ. A strategy to fill gaps in soil survey over large spatial extents: An example from the Murray-Darling basin of Australia. *Geoderma*. 2003;111:21-44.
- Bui EN. Soil survey as a knowledge system. *Geoderma*. 2004;120:17-26.
- Cohen J. A coefficient of agreement for nominal scales. *J Educ Measur*. 1960;20:37-46.
- Congalton RG. A review of assessing the accuracy of classification of remotely sensed data. *Remote Sens Environ*. 1991;37:35-46.
- Environmental Systems Research Institute - ESRI. ArcGIS. Professional GIS for the desktop. versão 9.3.1. CA: 2009.
- Giasson E, Sarmento EC, Weber E, Flores CA, Hasenack H. Decision trees for digital soil mapping on subtropical basaltic steepplands. *Sci Agric*. 2011;68:2.
- Hall M, Frank E, Holmes G, Pfahringer B, Reutemann P, Witten IH. The WEKA Data Mining Software: An Update. 2009. *SIGKDD Explor*. 2009;11:10-8.
- Hasenack H, Weber E. Base cartográfica vetorial contínua do Rio Grande do Sul - escala 1:50.000. [DVD-ROM]. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul; 2010. (Geoprocessamento, 3).
- Hengl T, Toomanian N, Recser HI, Malakocsi MJ. Methods to interpolate soil categorical variables from profile observations: lessons from Iran. *Geoderma*. 2007;140:417-27.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. Manual técnico de pedologia. 2ª.ed. Rio de Janeiro; 2007.

- Kämpf N, Giasson E, Streck EV. Levantamento pedológico e análise qualitativa do potencial de uso dos solos para o descarte de dejetos suínos da bacia do Rio Santo Cristo [relatório]. Porto Alegre: Secretaria do Meio Ambiente do Rio Grande do Sul; 2004.
- Lagacherie P, McBratney AB. Spatial soil information systems and spatial soil inference systems: Perspectives for digital soil mapping. In: Lagacherie P, McBratney AB, Voltz M, editors. Digital soil mapping: An introductory perspective. Amsterdam: Elsevier; 2007. p.3-24.
- McBratney AB, Mendonça-Santos ML, Minasny B. On digital soil mapping. *Geoderma*. 2003;117:3-52.
- Meyer DJ, Tachikawa T, Abrams M, Crippen R, Krieger T, Gesch D, Carabajal C. Summary of the validation of the second version of the ASTER GDEM. *Int Arch Photogr Remote Sens Spatial Inf Sci*. 2012;39-B4:291-3.
- Minasny B, McBratney AB. Incorporating taxonomic distance into spatial prediction and digital mapping of soil classes. *Geoderma*. 2007;142:285-93.
- Nardy AJR, Machado FB, Oliveira MFA. As rochas vulcânicas mesozoicas ácidas da Bacia do Paraná: Litoestratigrafia e considerações geoquímicoestratigráficas. *R Bras Geoci*. 2008;38:178-95.
- Nelson M, Odeh I. Digital soil class mapping using legacy soil profile data: A comparison of a genetic algorithm and classification tree approach. *Aust J Soil Res*. 2009;47:632-49.
- Roecker SM, Howell DW, Haydu-Houdeshell CA, Blinn C. A qualitative comparison of conventional soil survey and digital soil mapping approaches. In: Boettinger JL, Howell DW, Moore AC, Hartemink AE, Kienast-Brown S, editors. Digital soil mapping: Bridging research, environmental application, and operation. Dordrecht: Springer; 2010. p.369-84.
- Rossiter DG. Lecture notes and reference: Methodology for soil resource inventories. Enschede: ITC; 2000. (ITC Lecture Notes. SRI).
- Santos HG, Jacomine PKT, Anjos LHC, Oliveira VA, Lumberras JF, Coelho MR, Almeida JA, Cunha TJJ, Oliveira JB. Sistema brasileiro de classificação de solos. 3ª.ed. Brasília, DF: Embrapa; 2013.
- Scully P, Franklin J, Chadwick OA. The application of classification tree analysis to soil type prediction in a desert landscape. *Ecol Model*. 2005;181:1-5.
- Skidmore AK, Watford F, Luckananurug P, Ryan PJ. An operational GIS expert system for mapping forest soils. *Photogr Eng Rem Sens*. 1996;62:501-11.
- Shi X, Long R, Dekett R, Philippe J. Integrating different types of knowledge for digital soil mapping. *Soil Sci Soc Am J*. 2009;73:1682-92.
- Ten Caten A, Dalmolin RSD, Pedron FA, Mendonça-Santos ML. Regressões logísticas múltiplas: fatores que influenciam sua aplicação na predição de classes de solos. *R Bras Ci Solo*. 2011;35:53-62.
- Zhu AX, Hudson B, Burt J, Lubich K, Simonson D. Soil mapping using GIS, expert knowledge, and fuzzy logic. *Soil Sci Soc Am. J*. 2001;65:1463-72.