

Predição da fertilidade do solo do polo agrícola do Rio de Janeiro por meio de modelagem solo x paisagem

Sandra Fernandes de Andrade⁽¹⁾ e Maria de Lourdes Mendonça-Santos⁽²⁾

⁽¹⁾Universidade Federal Fluminense, Departamento de Geografia, Rua José do Patrocínio, nº 71, Centro, CEP 28015-030 Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil. E-mail: sfernandesdeandrade@yahoo.com.br ⁽²⁾Embrapa Cocais, Avenida São Luís Rei de França, nº 1, Quadra 11, Lote 4, Jardim Eldorado CEP 65067-205, São Luís, MA, Brasil. E-mail: lourdes.mendonca@embrapa.br

Resumo – O objetivo deste trabalho foi prever a fertilidade do solo no polo agrícola do Estado do Rio de Janeiro, por meio da modelagem solo x paisagem. A área de estudo compreendeu as regiões mais produtivas do Estado do Rio de Janeiro: Norte, Noroeste e Serrana. Características químicas do solo – pH em H₂O e capacidade de troca catiônica (CTC) – e ambientais – elevação, plano de curvatura, perfil de curvatura, índice de umidade, aspecto e declividade do terreno, além de tipos de solos, índice de vegetação normalizada (NDVI), imagens Landsat 7 e litologia – foram utilizadas como variáveis preditoras. A análise exploratória dos dados identificou valores extremos, os quais foram expurgados, na preparação para a análise por regressão linear múltipla (RLM). Aos resultados da RLM, foram adicionados os resultados de krigagem dos resíduos da regressão, com uma técnica de mapeamento digital de solos (MDS) denominada regressão-krigagem. Na região Serrana, as variáveis ambientais explicaram as variáveis químicas. A variável NDVI foi importante nas três regiões, o que evidencia a importância da cobertura vegetal para a predição da fertilidade do solo. Em geral, os solos analisados apresentaram baixo pH. Os valores de CTC, nas regiões estudadas, estão dentro do intervalo considerado bom para a fertilidade do solo.

Termos para indexação: mapeamento digital de solos, pedometria, regressão-krigagem, variabilidade espacial.

Prediction of soil fertility of the agricultural hub of the state of Rio de Janeiro using soil x landscape modeling

Abstract – The objective of this work was to predict soil fertility in the agricultural hub of the state of Rio de Janeiro, Brazil, using soil x landscape modeling. The studied area comprised the most productive regions of the state of Rio de Janeiro: northern, northwestern, and Serrana (highlands). Soil chemical traits – pH H₂O and cation exchange capacity (CEC) – and environmental variables – elevation, plane of curvature, curvature profile, moisture content index, aspect and slope of the terrain, in addition to soil types, normalized difference vegetation index (NDVI), Landsat 7 images, and lithology – were used as prediction variables. Exploratory data analysis identified outliers, which were purged, in the preparation for analysis by multiple linear regression (MLR). The kriging results of the regression residuals were added to the results of MLR, using a soil digital mapping (SDM) technique known as regression-kriging. In the Serrana region, the environmental variables explained the chemical variables. The NDVI variable was significant in all three regions, showing the importance of vegetation cover for the prediction of soil fertility. Generally, the tested soils showed low pH. The CEC values in the studied regions are within the range considered good for soil fertility.

Index terms: digital soil mapping, pedometrics, regression-kriging, spatial variability.

Introdução

As regiões Norte, Noroeste e Serrana do Estado do Rio de Janeiro possuem importância estratégica para a agricultura e são responsáveis por 60% do emprego agrícola nesse estado (Banco Mundial/Brasil..., 2012). A cana-de-açúcar destaca-se na região Norte, a qual ainda apresenta potencial para a fruticultura nos cultivos de abacaxi, coco, goiaba e maracujá

(IBGE, 2008). A região Noroeste caracteriza-se pela produção de tomate, maracujá, coco-verde e aipim. Já a região Serrana é grande produtora de hortaliças. Recentemente, os programas Florescer e Rio Rural levaram ao Rio especialista em rosas, e a produção tem alavancado na região (Agricultura..., 2015).

A área de estudo possui características importantes relacionadas ao relevo, como, por exemplo: a região Norte-Noroeste Fluminense, que é caracterizada por

uma extensa planície deltaica e apresenta diversos ambientes de deposição; a região Noroeste, que possui alinhamentos serranos escalonados e topografia bastante variável em meio aos terrenos colinosos; e a região Serrana, que apresenta relevo escarpado com amplitudes topográficas bastante expressivas (Dantas et al., 2001).

Segundo Muñoz (2009), o relevo é uma variável útil na separação de unidades de mapeamento de solos e na identificação de suas propriedades. Nesse sentido, destaca-se a possibilidade de avaliar as relações entre solo e relevo com recursos de geoprocessamento e modelagem de dados SRTM. Caten et al. (2011a) utilizaram regressões logísticas múltiplas na predição de classes de solos por meio de mapeamento digital (pedometria).

A variabilidade espacial e temporal dos nutrientes dos solos pode ser identificada e modelada por meio de métodos geoestatísticos ou de mapeamento digital de solos. Essa variabilidade espacial das propriedades do solo é muito influenciada pela atividade humana (Lagacherie, 2008).

O Mapeamento Digital de Solos (MDS) é baseado em métodos quantitativos e técnicas estatísticas, ao contrário das abordagens tradicionais de mapeamento, que enfatizam o uso do conhecimento empírico (Hengl, 2007). O MDS pode gerar informações e permitir, de forma mais quantitativa, o acesso ao conhecimento dos recursos naturais disponíveis em uma região, com a utilização de dados obtidos por satélites e de métodos matemáticos. Ele também permite que grandes áreas possam ser mapeadas a custos semelhantes aos de áreas menores e, além disso, facilita o monitoramento frequente da paisagem.

O MDS difere de metodologias convencionais de mapeamento de solos, pois é baseado em pixels, os quais podem ser visualizados em diferentes resoluções. Um modelo preditivo baseia-se na estimativa das propriedades do solo, a partir de sua probabilidade de ocorrência. O MDS utiliza relações quantitativas entre amostras de solo e covariáveis (solo x paisagem) que condicionam sua distribuição espacial, e pode ser utilizado para mapear propriedades do solo como conteúdo de pH, densidades do solo, CTC, saturação por base, entre outras.

A modelagem quantitativa dos solos tem sido proposta para descrever, classificar e estudar os padrões de variação espacial dos solos na paisagem. Seu

objetivo é melhorar o conhecimento da variabilidade espacial, da precisão e da qualidade da informação, por meio de diversas técnicas quantitativas, chamadas, no conjunto, de pedometria. Avanços em teorias matemáticas – redes neurais, por exemplo – e métodos estatísticos, bem como sistemas remotos de aquisição de dados e informática, têm possibilitado o crescimento de estudos envolvidos em pedometria (Bui, 2007).

Espera-se que os modelos de predição linear para dados espaciais sejam mais precisos e confiáveis, como, por exemplo, com o uso da técnica de mapeamento regressão + krigagem (RK) (Hengl, 2007). A RK é uma técnica de interpolação espacial que combina a regressão de uma variável dependente de variáveis auxiliares – obtidas do terreno, de imagens de satélite e de mapas temáticos – com a krigagem dos resíduos da regressão (Pebesma, 2006).

Recentemente, técnicas pedométricas têm se diversificado, e as pesquisas cobrem um amplo e interessante grupo de aplicações, tais como a modelagem da variação espacial e taxa de infiltração d'água no solo (Zimmerman et al., 2008), efeitos das variáveis ambientais sobre a gênese e morfologia dos solos (Lagacherie & McBratney, 2007), modelagem solo-paisagem com análises digitais de terreno (Sommer et al., 2008), mapeamento digital de solos com a aplicação de técnicas de mineração de dados a descritores de relevo e a dados de mapas geológico e pedológico (Crivellini et al., 2009), predição de propriedades de fertilidade do solo com dados espectrais no infravermelho médio com distribuição global (Terhoeven-Urselmans et al., 2010), entre outras.

A significativa redução de custos do MDS em relação ao mapeamento convencional faz com que grandes áreas possam ser mapeadas com custos semelhantes aos de áreas menores e, ainda, facilita o monitoramento. Nesse caso, o mapeamento da fertilidade dos solos pode ser importante para as regiões Norte, Noroeste e Serrana do Estado do Rio de Janeiro, que são consideradas as mais produtivas.

O objetivo deste trabalho foi prever a fertilidade do solo no polo agrícola do Estado do Rio de Janeiro por meio da modelagem solo x paisagem.

Material e Métodos

As regiões Norte, Noroeste e Serrana do Estado do Rio de Janeiro localizam-se entre as coordenadas

43°22'35" e 40°57'27"W; e 20°45'47" e 22°34'21"S, correspondendo a uma área de aproximadamente 22.000 km² (Figura 1).

A área de estudo representa quatro geoambientes, dos oito existentes no Estado do Rio de Janeiro: na região Norte, o geoambiente Faixa Litorânea, que ocupa a Baixada Campista; nas regiões Norte e Noroeste, os geoambientes Norte-Noroeste Fluminense e Planalto do Alto Itabapoana (também denominado de planalto de Varre-Sai); e, na Região Serrana, o Planalto da Região Serrana (Lumbreras et al., 2004).

No Norte Fluminense, destaca-se a Baixada Campista (geoambiente Faixa Litorânea), extensa planície deltaica, caracterizada por diversos ambientes

deposicionais, com microrrelevo, ondulados, de amplitudes topográficas inferiores a 20 m, geradas por processos de sedimentação marinha e/ou eólica: destacam-se vastos depósitos fluviolagunares, ou brejos, no entorno da Lagoa Feia, solos com altos teores de sais e enxofre, como os Gleissolos Salinos e/ou Tiomórficos, sendo, portanto, altamente limitantes às atividades agropecuárias (Lumbreras et al., 2004). Os terrenos colinosos de gradientes suaves e baixas amplitudes de relevo, situados à retaguarda dos cordões arenosos e das lagoas costeiras, abrangem uma grande extensão da denominada “Baixada Fluminense” e possuem baixa suscetibilidade à erosão, sendo aproveitados apenas por pastagem.

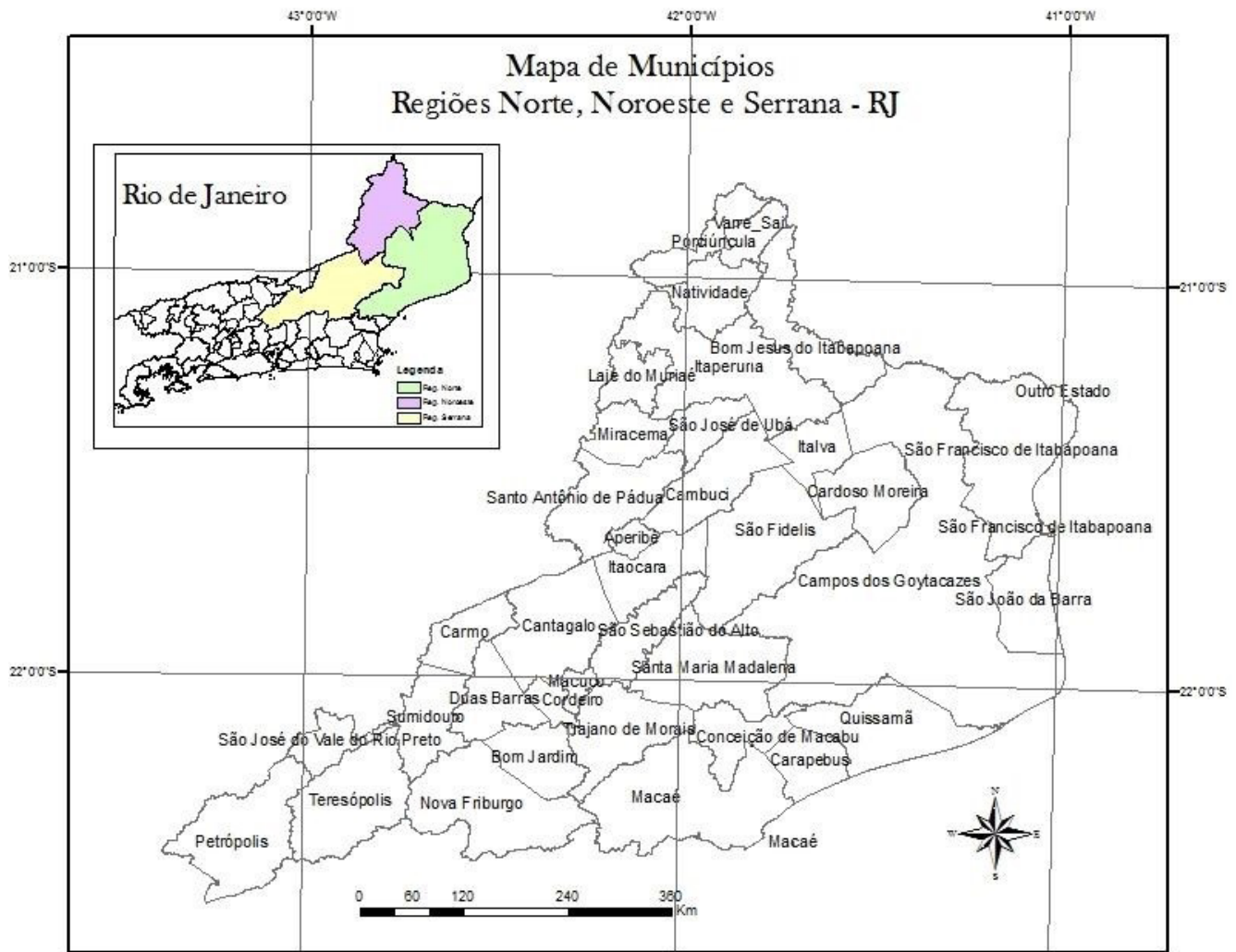


Figura 1. Mapa de municípios do Rio de Janeiro nas regiões Norte, Noroeste e Serrana. Fonte: IBGE (2008).

Esses terrenos, em grande parte constituídos por solos profundos e bem drenados (Latosolos e Argissolos Vermelho-Amarelos), são indicados para a introdução de sistemas agropastoris. O clima da região Norte, de acordo com a classificação de Köppen, é do tipo Cwa, e a precipitação média anual é de 1.440 mm (Dantas et al., 2001).

Na região Noroeste (geoambientes Norte-Noroeste Fluminense e Planalto do Alto Itabapoana), a topografia é bastante variável, com influência sobre as características dos solos. Relevos com 35 a 680 m são observados no sentido norte em direção à Serra da Mantiqueira e a partir da calha do rio Paraíba do Sul. Em relevos menos acidentados, de conformação suave, contíguos às baixadas, predominam os Argissolos. Esses solos estão associados com os Gleissolos, situados nas baixadas. Nas áreas mais íngremes do Planalto do Alto Itabapoana, ocorrem os Argissolos Vermelhos e Argissolos Vermelho-Amarelos. O clima da região Noroeste, de acordo com a classificação de Köppen, é do tipo Aw, e a precipitação média anual é de 900 a 1.400 mm/ano (Dantas et al., 2001).

A região Serrana (inclui Planalto da Região Serrana e Serra dos Órgãos) compreende as zonas mais elevadas (com amplitude de 300 a 2.800 m) das escarpas serranas. As escarpas serranas apresentam, em geral, solos pouco espessos e bastante lixiviados (Cambissolos e Latossolos Vermelho-Amarelos álicos), em virtude de um clima bastante úmido, proporcionado pela barreira física imposta ao avanço dos sistemas frontais (efeito orográfico) (Dantas et al., 2001). O clima da região Serrana, de acordo com a classificação de Köppen, é Cwb, tropical de altitude, com temperaturas que variam de 8 a 25°C durante o ano.

Utilizou-se a base de dados de solos do Estado do Rio de Janeiro, construída em Access e Delphi (Mendonça-Santos et al., 2008), a qual dispõe de 731 perfis de solos. O banco de dados de solo que deu suporte a este trabalho foi organizado pela seleção de duas variáveis que controlam ou influenciam a fertilidade dos solos em geral e dos solos tropicais: pH H₂O e CTC.

A escolha das variáveis químicas de fertilidade do solo pH e CTC (capacidade de troca catiônica) está associada diretamente com a essencialidade desses nutrientes para as plantas. A CTC tem sido utilizada na avaliação do efeito do manejo do solo (Omuto et al.,

2013) e alterações na mineralogia dos solos (Azevedo et al., 2012).

Dessa base, selecionaram-se 228 perfis, correspondendo a 133 perfis na região Norte, 45 na região Noroeste e 50 na região Serrana. Contudo, utilizou-se somente a camada com profundidade de 0,0–0,1 m, pois foi a que continha as duas variáveis selecionadas nesse estudo.

As variáveis ambientais também foram extraídas dessa base de dados, e são variáveis correlacionáveis a fertilidade do solo: o uso da terra (por meio de imagens de satélite, bandas 7, 4 e 2 em R, vermelho; G, verde; e B, azul) (Nasa, 2007); o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI); mapas de classes litológicas (CPRM, 2001) e Modelo Digital do Terreno (MDT) da SRTM (Jarvis et al., 2006), com malha de 90 m e corrigidas por Mendonça-Santos et al. (2008).

Utilizou-se o programa Erdas 9.0, a partir do qual foi elaborada uma malha de 90 m, extraída do MDT SRTM, a ser usada para o mapeamento digital das propriedades do solo. Por meio do Erdas e utilizando-se um shape da área de estudo, obteve-se o recorte da área das três regiões e, com o mesmo programa, foi possível fazer a extração de informações de pixels dos pontos de cada perfil, na imagem SRTM.

No programa Jump 6.0, foi organizado o banco de dados com as variáveis químicas do solo e ambientais (as derivadas de terreno plano de curvatura, perfil de curvatura, índice de umidade, aspecto e declividade, além dos tipos de solos, índice de vegetação normalizada – NDVI –, Imagens Landsat 7 e informações sobre a Litologia), para cada perfil de solo do banco de dados, para a realização da regressão linear múltipla. Para cada área de estudo foram organizados outros bancos de dados com informações de variáveis ambientais de toda a área e das três regiões em separado, para a realização da RLM + krigagem. São elas: classes de solos, litologia, uso do solo, NDVI e os atributos de terreno, que são elevação, aspecto, plano de curvatura, perfil de curvatura e índice de umidade.

Uma vez que os dados de fertilidade da camada de 0,0–0,1 m de profundidade do solo foram organizados e sistematizados, realizou-se a análise exploratória dos dados com auxílio do programa Statistica 7.0. Essa análise foi importante para a identificação de valores extremos. Foram identificadas médias, medianas, erro padrão e assimetria dos dados para cada região.

Após a análise exploratória dos dados de fertilidade e das variáveis ambientais, a modelagem e a predição de propriedades de solos foram elaboradas por meio de regressão múltipla no programa Jump 6.0. A plataforma *stepwise* permite pesquisar através de modelos e, com diversas combinações, escolher o modelo desejado. Os parâmetros estatísticos analisados para avaliação dos modelos foram os seguintes: RMSE (raiz quadrada do erro médio); AIC (critério de informação de Akaike); Cp (criterion parameter); R-quadrado ajustado; e a probabilidade de F.

O modelo que apresenta menor valor de AIC, RMSE, Cp, o maior valor de F (melhor ajuste do modelo) e maior R-quadrado ajustado é utilizado para a predição final e mapeamento das propriedades de fertilidade do solo (neste caso, pH e CTC, podendo ser utilizados para outras variáveis).

Em todos os modelos preditos, foi utilizada uma probabilidade de 25% para a entrada dos dados no *stepwise*. As estatísticas da regressão estimada incluem o R^2 , RMSE, o AIC, Cp, a estatística F e sua probabilidade de ocorrência sob H_0 (hipótese nula), para fins de comparação dos modelos preditos e escolha do melhor modelo a ser usado no mapeamento de cada atributo de fertilidade. Nessa análise comparativa, foram considerados os menores valores de AIC e RMSE, maior valor de R^2 ajustado e a probabilidade de F ser diferente de zero.

Após a obtenção do ajuste por RLM, utilizando-se os pontos amostrais, é necessário somar o valor predito (calculado com a fórmula da regressão) com a krigagem dos resíduos (resultante da regressão) do modelo, a fim de obter um melhor ajuste do modelo. Para realizar o processo de krigagem dos resíduos da estimativa do modelo, utilizou-se o programa Vesper 1.6 Interface4 (variograma de estimação e predição espacial com erro). Testaram-se as opções de semivariogramas exponencial, esférico e gaussiano.

Para espacializar o resultado da modelagem, é necessário converter os valores do atributo (CTC, pH) desejado para o formato dbf. Uma vez exportado o arquivo para dbf, este pode ser lido em qualquer SIG. Neste caso, foi utilizado o programa ArcGIS 9.3.1. Na produção dos mapas (espacialização), foi usada a projeção WGS1984 23S. O arquivo gerado pela ferramenta é um arquivo vetorial de pontos temporários (arquivo “events”). Após criar o arquivo events no ArcMap, é necessário gravá-lo no formato

“shapefile”. Neste shapefile, cada um dos pontos criados contém uma coordenada vinda do banco de dados das variáveis ambientais. Ainda no ArcGIS 9.3.1, este arquivo shapefile deve ser transformado em raster.

Para a criação das legendas no mapa, usaram-se as classes das distribuições de frequência das variáveis de fertilidade, por meio do método de aproximação denominado “rupturas naturais” (em inglês, *natural breaks*). Foram criadas três classes (alto, médio e baixo) para cada um dos planos de informação das variáveis, respeitando-se os dados adquiridos nos modelos RLM. Para uma melhor adequação das classes, foi ajustada, com referências da literatura relacionadas aos solos brasileiros (Raij, 1991; Souza & Lobato, 2004), pesquisa bibliográfica que compatibilizasse as faixas de valores do estudo (Tabela 1).

Resultados e Discussão

A análise estatística dos dados dos atributos químicos, após a retirada de valores extremos, nas três regiões, revelou que tanto o pH como a CTC apresentaram distribuição próxima da normal.

Para a região Norte do estado, a CTC apresentou correlação significativa e positiva com a variável ambiental aspecto (0,55), o que também foi encontrado por Pennock & Veldkamp (2006). A variável índice de umidade também apresentou correlações positivas e significativas com as variáveis pH (0,29) e CTC (0,50). Esse resultado evidencia que a umidade do solo é um dos fatores que afeta o padrão espacial dos processos naturais, entre eles a distribuição das propriedades dos solos (Fu & Rich, 1999).

Na região Noroeste, foi observado que a variável elevação obteve correlações positivas com o pH (0,28). Como o relevo da região é bastante movimentado, essa variável torna-se importante para explicar a variabilidade de pH na região. Moore et al. (1993) foram capazes de explicar 48,3% da variação de pH com diversos atributos do terreno (elevação,

Tabela 1. Concentração das variáveis químicas para a fertilidade dos solos brasileiros.

Variáveis químicas	Baixa	Média	Boa	Autores
pH H ₂ O	<5,0	5,0–6,0	6,0–6,5	Raij (1991)
CTC (cmol _c kg ⁻¹)	0,61–4,30	4,31–8,60	≥ 8,61	Souza & Lobato (2004)

CTC, capacidade de troca catiônica.

declividade, aspecto, entre outros), após uma análise de correlação dos dados. O nível de significância entre as correlações, na maioria das vezes, é baixo, por muitas propriedades do solo terem grande variabilidade e por variáveis químicas e variáveis ambientais terem origens diferenciadas.

Na região Serrana, ocorreram correlações positivas da variável ambiental elevação com pH H₂O (0,62) e CTC (0,41). Outra correlação significativa, na mesma região, ocorreu com a variável ambiental declividade e pH H₂O, que obtiveram correlação positiva (0,62). A declividade tem sido considerada um dos mais importantes fatores abióticos que controlam o processo pedogenético em uma escala local ou regional (Arruda et al., 2013). Para uma melhor compreensão das causas da variabilidade do solo, é importante o conhecimento do relevo. Essa variabilidade é influenciada pelo fluxo de água que é controlado pelo relevo.

Nas análises de regressão, os valores de AIC e RMSE diminuíram, os valores do R² ajustado foram maiores, e as probabilidades de F ser diferente de zero aumentaram. Quanto maior o valor do R², maior o poder de explicação da equação de regressão e, portanto, melhor a previsão da variável dependente. Quanto menor a probabilidade de F ser igual a zero, mais significativo é seu valor numérico e, assim, melhor é o modelo. Logo, esses resultados representam os melhores modelos. Menores valores de AIC e RMSE também foram considerados como melhor modelo por Mendonça-Santos et al. (2007).

Na região Norte, as variáveis ambientais derivadas de terreno (perfil de curvatura, índice de umidade), tipo de solo (Argissolo e Latossolos) e litologia (Granitos) explicaram a variação de pH H₂O na região, com R²aj = 0,32. Esse resultado indica fraca correlação com os preditores. Hengl et al. (2006) realizaram regressão-krigagem da variável pH com dados ambientais (tais como índice de umidade, declividade, curvatura, entre outros), utilizando regressão e a mesma metodologia. Os autores também obtiveram um coeficiente de determinação pequeno (R²aj = 0,14) em seus resultados, corroborando o presente trabalho. O atributo CTC foi explicado pelas variáveis ambientais derivadas de terreno (índice de umidade) e de tipo de solo (Gleissolo). Na regressão, essas variáveis explicaram mais da metade da variação de CTC no solo, apresentando um R²aj = 0,53, e um RMSE = 7,13. Os Gleissolos, em geral, possuem um

acúmulo de matéria orgânica, e ocorrem em relevo plano, ao longo das várzeas, nas regiões litorâneas, e nas planícies costeiras e delta do Rio Paraíba do Sul.

Na região Noroeste, as variáveis ambientais do tipo de solo (Argissolo e Gleissolos), derivadas do terreno (elevação), explicaram a variação de pH H₂O na região, com R²aj = 0,34. As variáveis ambientais relacionadas às derivadas de terreno (elevação, aspecto e índice de umidade), organismos (organismos, neste caso, envolvem também a vegetação) (NDVI) e litologia explicaram a variação de CTC na região, com R²aj = 0,44.

Na região Serrana, as variáveis ambientais de relevo (declividade e aspecto) e tipo de solo (Cambissolo) explicaram a variação de pH H₂O na região, com R²aj = 0,46, indicando ser significativo e com forte correlação entre as variáveis. As variáveis ambientais de relevo (elevação e índice de umidade) e tipo de solo (Latossolo) explicaram a variação CTC na região, com R²aj = 0,56, indicando ser significativo. Sendo assim, a predição pode ser considerada de qualidade. Em seu trabalho, Caten et al. (2011b) obtiveram bons resultados com as covariáveis elevação e índice de umidade. Os mapas das variáveis pH H₂O e CTC apresentados têm por finalidade ampliar a visão geopolítica nas três regiões do polo agrícola do Rio de Janeiro.

A Figura 2 A ilustra o mapa final por RLM da variável pH H₂O (RLM + resíduo), os histogramas das concentrações modeladas (Figura 2 B) das três regiões, Norte, Noroeste e Serrana.

A região Norte apresenta níveis de pH entre 2,2 e 4,9, níveis entre 4,9 e 5,6 e níveis entre 5,9 e 7,9 (Figura 2 B). Esses níveis de pH são semelhantes aos definidos por Malavolta (1980): baixo -- extremamente ácido (entre 2,2 e 4,9) –, médio – muito ácido (entre 4,9 e 5,5) – e alto – entre médio e neutro (entre 5,9 e 7,9). A região da Baixada Campista (Lumbreras et al., 2004) tem as áreas mais planas da região Norte e mais ácidas, com pH entre 2,2 e 4,9. A acidez do solo é um fator importante na análise da degradação e da qualidade do solo (Reinds et al., 2008). Na região Serrana, cerca de 55% das concentrações de pH têm níveis entre 5,2 e 5,9, considerados médios. Verifica-se que no domínio Planalto da região Serrana, apresenta-se uma concentração de pH médio.

A Figura 3 A ilustra o mapa final de CTC (RLM + krigagem), os histogramas (Figura 3 B) da distribuição para as regiões Norte, Noroeste e Serrana. Na Figura 3

A, nota-se que a Faixa Litorânea apresenta uma maior concentração dos níveis de CTC entre 19,4 e 42,0 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$, e ocupa uma pequena porção da região da Baixada Campista (5%). Os teores considerados bons para as plantas estão acima de 8,61 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$, mas os valores ótimos são acima de 15 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$, o que corresponde a uma área de 0,1% da região Norte. Os níveis considerados altos de CTC estão entre 10 e 19 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ e ocupam 38% da região Norte. Os níveis mais baixos de CTC estão entre 1,6 e 10 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$, e ocupam 54% da região (Figura 3 B). As regiões que apresentam maior nível de CTC, segundo Souza e Lobato (2004), estão associadas aos Gleissolos e aos Cambissolos. Os Gleissolos, em geral, possuem um acúmulo de matéria orgânica importante para a manutenção de uma boa CTC, e ocorrem em relevo plano, ao longo das várzeas, nas regiões litorâneas, e nas planícies costeiras e delta do Rio Paraíba do Sul.

Na região Noroeste, mais precisamente, no compartimento do Planalto do Alto Itabapoana,

existe uma maior concentração de níveis altos de CTC (entre 30 e 51 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$). Na região que possui os maiores níveis de CTC predominam Latossolos Vermelho-Amarelos, que ocorrem nos interflúvios aplainados e de conformação convexa, e Argissolos Vermelho-Amarelos, situados, preferencialmente, nos patamares de nível inferior no relevo.

Na região Serrana, apresentam-se níveis de CTC considerados bons, segundo a literatura, entre 8,1 e 17 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$, que estão mais concentrados no sul do município de Petrópolis, ao sul de Teresópolis e ao norte de Nova Friburgo. Os valores medianos dos níveis de CTC entre 5,5 e 8,1 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ ocorrem em 20% dos dados no domínio. Os níveis mais baixos – segundo a literatura, baixos – estão na porção Norte da região. A região Serrana possui uma pluviosidade considerada elevada, o que pode causar a lixiviação de bases permutáveis do solo. Os níveis considerados médios e altos nesses compartimentos estão associados a solos do tipo Cambissolo e Latossolo. Os Cambissolos, por

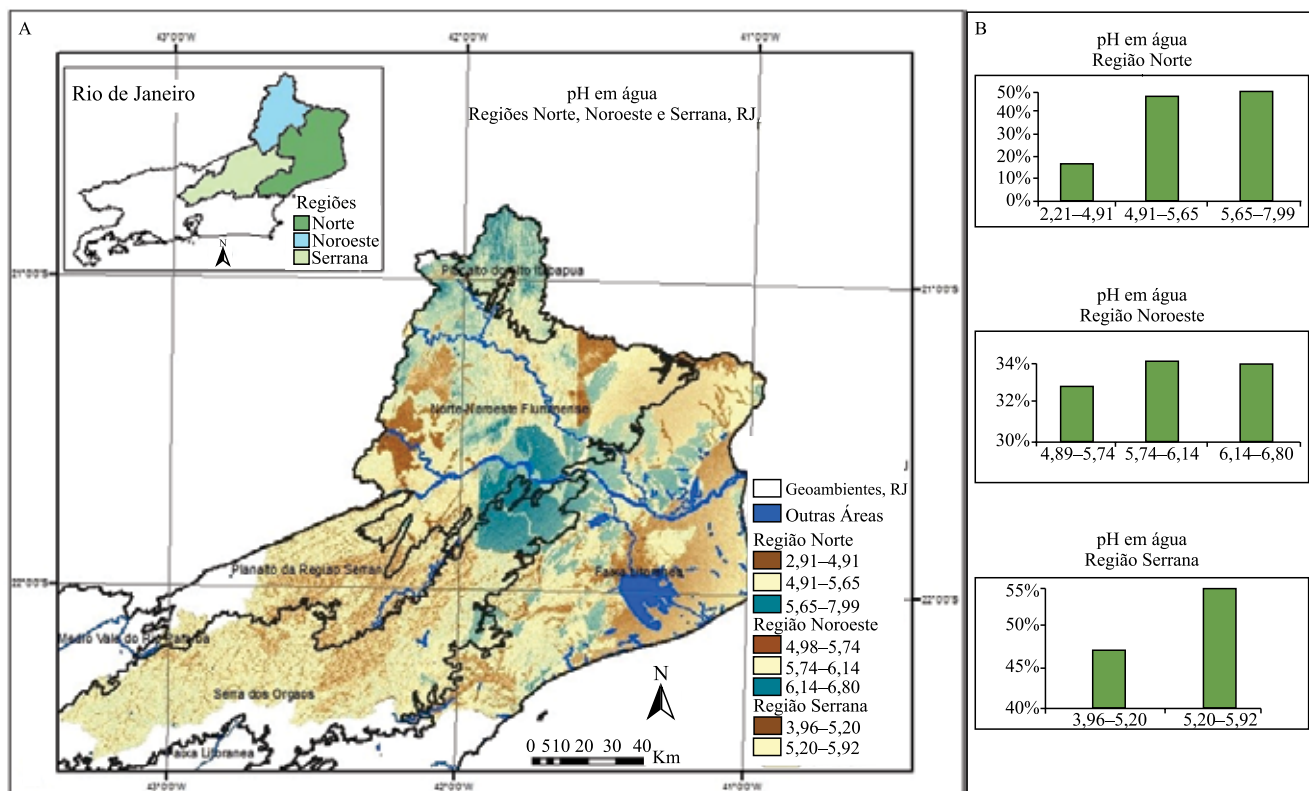


Figura 2. Espacialização do pH H₂O nos geoambientes e histogramas com a distribuição das áreas com diferentes faixas de pH, nas regiões Norte, Noroeste e Serrana, RJ.

exemplo, podem ser desenvolvidos a partir de rochas, em relevo forte-ondulado a montanhoso.

A capacidade de troca catiônica, nas regiões Norte, Noroeste e Serrana, está dentro da faixa ótima para fertilidade nas três regiões. Apenas cerca de 5% da região Norte apresentou níveis abaixo de 10 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ de capacidade de troca catiônica. Esses resultados corroboram resultados obtidos por Andrade et al. (2014) em seus estudos na região Norte Fluminense.

O mapeamento digital que utilizou regressão krigagem (regressão + krigagem dos resíduos) e dados auxiliares, os dados ambientais, obteve bons resultados de predição. Os resultados obtidos neste trabalho indicam a importância da informação secundária disponível, que é usada para modelar a variação de um atributo do solo. A modelagem quantitativa, acompanhada de questões que envolvem acurácia e incertezas, pode contribuir para o conhecimento

das tendências e para a conservação e uso adequado do solo, mesmo quando baseada em dados de solos existentes.

A abordagem quantitativa e a modelagem solo-paisagem, como realizada neste trabalho, podem servir de base para estudos mais detalhados, com novas amostragens direcionadas à fertilidade natural e antrópica, no intuito de subsidiar a tomada de decisão no uso e manejo dos solos. A inserção de informações ambientais disponíveis, como dados de solo, relevo e clima, auxilia na predição em locais não medidos, com significativa redução de custos em relação ao mapeamento convencional.

Esses resultados podem auxiliar nas políticas públicas do Estado do Rio de Janeiro na expansão agrícola dessas áreas, podendo contribuir para um maior fortalecimento do setor agrícola do Estado do Rio de Janeiro.

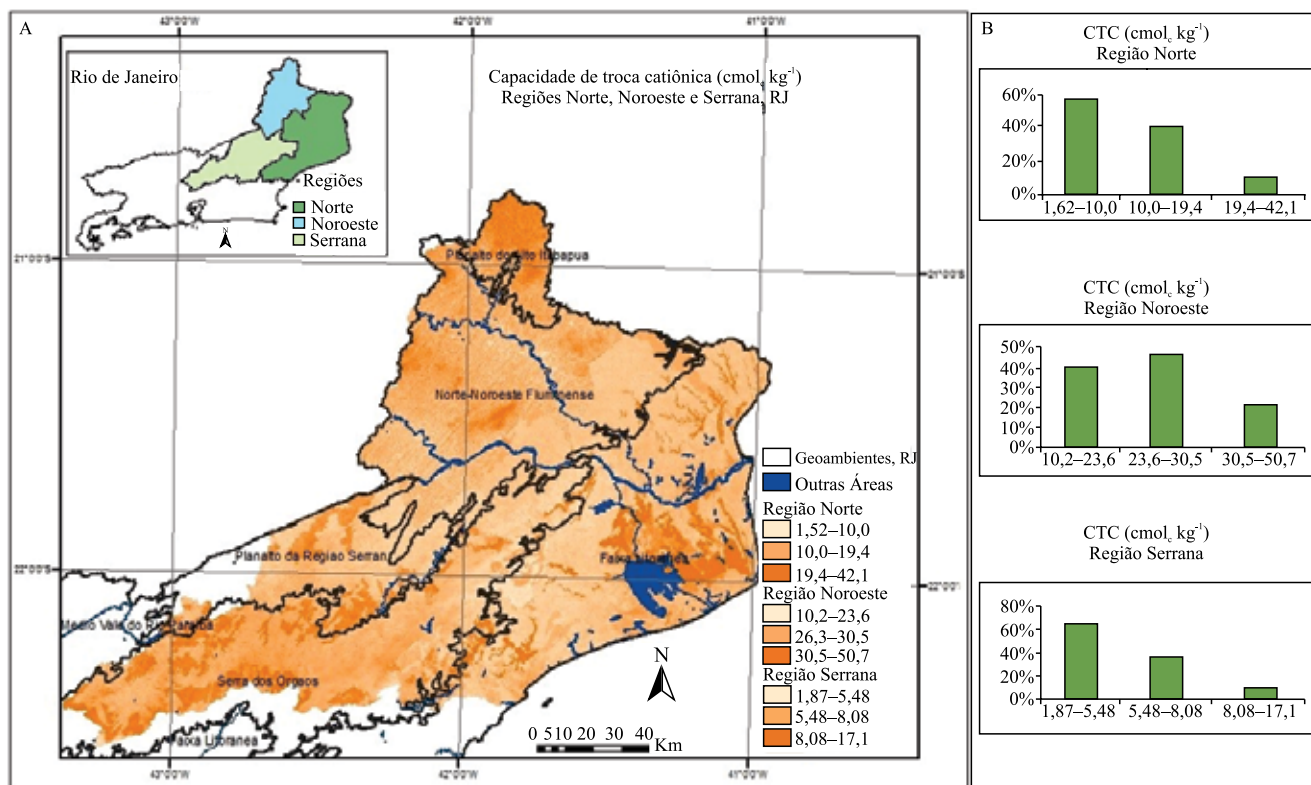


Figura 3. Espacialização da CTC nos geoaambientes e histogramas com a distribuição das áreas com diferentes faixas de CTC, nas regiões Norte, Noroeste e Serrana, RJ.

Conclusões

1. Os geoambientes apresentam acidez bastante elevada, e representa limitação à produção agrícola em Campos dos Goytacazes, na região Norte, mais precisamente na Faixa Litorânea.

2. O modelo de predição indica diferenças mínimas de CTC entre as regiões avaliadas.

Referências

- AGRICULTURA investe na melhoria da produção de rosas no estado: Programas Florescer e Rio Rural trazem especialista de Holambra para orientar produtores da flor na Região Serrana. 2015. Disponível em: <<http://www.rj.gov.br/web/seapec/exibeconteudo?article-id=2650856>>. Acesso em: 24 nov. 2015.
- ANDRADE, W.E. de B.; FERREIRA, J.M.; RÊGO FILHO, L. de M.; SOUZA FILHO, B.F. de. Atributos químicos do solo em lavouras de café conilon no Norte Fluminense. **Informações Tecnológicas**, n.23, 2014.
- ARRUDA, G.P. de; DEMATTÊ, J.A.M.; CHAGA, C. da S. Mapeamento digital de solos por redes neurais artificiais com base na relação solo-paisagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.37, p.327-338, 2013. DOI: 10.1590/S0100-06832013000200004.
- AZEVEDO, A.C. de; PEDRON, F. de A.; SARTOR, L. R.; CASARINI, P.G. Filossilicatos 2:1 com hidróxi entre camadas em solos: estado atual do conhecimento e das perspectivas de pesquisa. **Revista de Ciências Agrárias**, v.55, p.236-243, 2012.
- BANCO Mundial/Brasil: projeto rural beneficiará 47 mil agricultores no Estado do Rio de Janeiro. 2012. Disponível em: <<http://www.worldbank.org/pt/news/press-release/2012/11/06/brazil-some-47000-farmers-state-rio-de-janeiro-benefit-from-rural-project>>. Acesso em: 10 dez. 2015.
- BUI, E. A review of digital soil mapping in Australia. In: LAGACHERIE, P.; MCBRATNEY, A.B.; VOLTZ, M. (Ed.). **Digital soil mapping**: an introductory perspective. Amsterdam: Elsevier, 2007. p.25-37. DOI: 10.1016/S0166-2481(06)31002-1.
- CATEN, A. ten, DALMOLIN, R.S.D.; PEDRON, F.A., SANTOS, M.L.M. Regressões logísticas múltiplas: fatores que influenciam sua aplicação na predição de classes de solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p.53-62, 2011a.
- CATEN, A. ten; DALMOLIN, R.S.D.; PEDRON, F. de A.; SANTOS, M. de L.M. Extrapolação das relações solo-paisagem a partir de uma área de referência. **Ciência Rural**, v.41, p.812-816, 2011b. DOI: 10.1590/S0103-84782011000500012.
- CPRM. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (Brasil). **Rio de Janeiro**: geologia, geomorfologia, geoquímica, geofísica, recursos minerais, economia mineral, hidrogeologia, estudos de chuvas intensas, solos, aptidão agrícola, uso e cobertura do solo, inventário de escorregamentos, diagnóstico geoambiental. Rio de Janeiro: CPRM: Embrapa Solos; [Niterói]: DRM-RJ, 2001.
- CRIVELANTI, R.C.; COELHO, R.M.; ADAMI, S.F.; OLIVEIRA, S.R. de M. Mineração de dados para inferência de relações solo-paisagem em mapeamentos digitais de solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.51, n.9, p.1386-1395, set. 2016. DOI: 10.1590/S0100-204X2016000900037
- Agropecuária Brasileira**, v.44, p.1707-1715, 2009. DOI: 10.1590/S0100-204X2009001200021
- DANTAS, M.E.; SHINZATO, E.; MEDINA, A.I.M.; SILVA, C.R. da; PIMENTEL, J.; LUMBRERAS, J.F.; CALDERANO, S.B.; CARVALHO FILHO, A. de. Diagnóstico geoambiental do Estado do Rio de Janeiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 28., 2001, Londrina. **Ciência do solo**: fator de produtividade competitiva com sustentabilidade. Londrina: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2001. 35p.
- FU, P.; RICH, P.M. Design and implementation of the Solar Analyst: an ArcView extension for modeling solar radiation at landscape scales. In: Annual Esri User Conference, 19., 1999, San Diego. 1999. **Proceedings**. [S.l.: s.n.]: 1999.
- HENGL, T. **A practical guide to geostatistical mapping of environmental variables**. Luxembourg: European Commission, 2007.
- HENGL, T. **Pedometrics mapping**: bridging the gaps between conventional and pedometric approaches. Enschede: Wageningen University, 2006. 236p.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Downloads**: estatísticas. 2008. Disponível em: <http://www.downloads.ibge.gov.br/downloads_estatisticas.htm/>. Acesso em: 25 jan. 2010.
- JARVIS, A.; REUTER, H.I.; NELSON, A.; GUEVARA, E. **Hole-filled SRTM for the globe Version 3, from the CGIAR-CSI SRTM 90m database**. 2006. Disponível em: <<http://srtm.csi.cgiar.org>>. Acesso em: 24 maio 2010.
- LAGACHERIE, P. Digital soil mapping: a state of the art. In: HERTMINK, A.E.; MCBRATNEY, A.; MENDONÇA-SANTOS, M. de L. **Digital soil mapping with limited data**. [S.l.]: Springer, 2008. p.3-14.
- LAGACHERIE, P.; MCBRATNEY, A.B. Spatial Soil Information System and Spatial Soil Inference Systems: Perspectives for Digital Soil Mapping. In: LAGACHERIE, P.; MCBRATNEY, A.B.; VOLTZ, M. (Ed). **Digital soil mapping**: an introductory perspective. Amsterdam: Elsevier, 2007. (Developments in Soil Science, v.31).
- LUMBRERAS, J. F; CARVALHO FILHO, A. de; MOTTA, P.E.F. da; PALMIERI, F.; CALDERANO, S.B.; BARUQUI, A.M.; PEREIRA, N.R.; NAIME, U.J.; LEMOS, A.L. **Macropedoambientes da região Noroeste Fluminense – uma contribuição ao planejamento ambiental**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2004. 21p. (Embrapa Solos. Documentos, 64).
- MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1980. 251p.
- MENDONÇA-SANTOS, M. de L.; SANTOS, H. G. dos; DART, R. de O.; PARES, J.G. **Modelagem e mapeamento digital de estoque de carbono orgânico na camada superficial dos solos (0-10 cm) do Estado do Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2007. (Embrapa Solos. Boletim de pesquisa e desenvolvimento, 120).
- MENDONÇA-SANTOS, M.L.; SANTOS, H.G.; DART, R.O.; PARES, J.G. Digital mapping of soil classes in Rio de Janeiro state, Brazil: data, modelling and prediction. In: HARTEMINK, A.E.; MCBRATNEY, A.B.; MENDONÇA-SANTOS, M. de L. (Ed.). **Digital soil mapping with limited data**. [S.l.]: Springer, 2008. p.381-396.

- MOORE, I.D., GESSLER, P.E., NIELSEN, G.A., PETERSON, G.A. Soil attribute prediction using terrain analysis. **Soil Science Society of America Journal**, v.57, p.443-452, 1993. DOI: 10.2136/sssaj1993.03615995005700020026x.
- MUÑOZ, V.A. **Análise geomorfológica de dados SRTM aplicada ao estudo das relações solo-relevo**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2009. INPE-15796-TDI/1531. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2009/03.25.15.09>>. Acesso em: 25 jun. 2010.
- NASA. ESTADOS UNIDOS. National Aeronautics and Space Administration. **U.S. Releases Enhanced Shuttle Land Elevation Data**. Disponível em: <<http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>>. Acesso em: 2 maio 2007.
- OMUTO, C; NACHTERGAELE, F.; ROJAS, R.V. **State of the Art Report on Global and regional Soil Information: Where are we? Where to go?** Rome: FAO, 2013. 69p. Global soil partnership. Technical Report.
- PEBESMA, E.J. The Role of External Variables and GIS Databases in Geostatistical Analysis. **Transactions in GIS**, v.10, p.615-632, 2006. DOI: 10.1111/j.1467-9671.2006.01015.x.
- PENNOCK, D.J.; VELDKAMP, A. Advances in landscape-scale soil research. **Geoderma**, v.133, p.1-5, 2006. DOI: 10.1016/j.geoderma.2006.03.032.
- RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e adubação**. São Paulo: Agronômica Ceres; Piracicaba: Potafos, 1991. 343p.
- REINDS, G.J.; OIJEN, M. van; HEUVELINK, G.B.M.; KROS, H. Bayesian calibration of the VSD soil acidification model using European forest monitoring data. **Geoderma**, v.146, p.475-488, 2008. DOI: 10.1016/j.geoderma.2008.06.022.
- SOMMER, M.; GERKE, H.H.; DEUMLICH, D. Modelling soil landscape genesis - a "time split" approach for hummocky agricultural landscapes. **Geoderma**, v.145, p.480-493, 2008. DOI: 10.1016/j.geoderma.2008.01.012.
- SOUZA, D.M.G. de; LOBATO, E. (Ed.). **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2.ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica; Planaltina: Embrapa Cerrados, 2004. 416p.
- TERHOEVEN-URSELMANS, T.; VAGEN, T.-G.; SPAARGAREN, O.; SHEPHERD, K.D. Prediction of soil fertility properties from a globally distributed soil mid-infrared spectral library. **Nutrient Management and Soil and Plant Analysis**, v.74, p.1792-1799, 2010.
- ZIMMERMAN, B.; ELSENBEER, H. Spatial and temporal variability of soil saturated hydraulic conductivity in gradients of disturbance. **Journal of Hydrology**, v.361, p.78-95, 2008. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.07.027>.

Recebido em 31 de agosto de 2015 e aprovado em 18 de maio de 2016