

Imagens de satélite da vegetação nativa no mapeamento da variabilidade espacial de atributos do solo

Rodrigo Gonçalves Trevisan¹, Mateus Tonini Eitelwein¹, André Freitas Colaço¹, Tiago Capello Garzella², José Paulo Molin³

¹ Pós-graduando em Engenharia de Sistemas Agrícolas, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz – Universidade de São Paulo (ESALQ – USP), Piracicaba, São Paulo, Brasil, rodrigoagronomia@hotmail.com, mateus_eitelwein@outlook.com, andre.colaco@usp.br

² Engº Agrônomo, Dr. em Ciências, APAGRI – Diretor, Piracicaba, São Paulo, Brasil, tiago@apagri.com.br

³ Professor Associado III, ESALQ – USP, Piracicaba, São Paulo, Brasil, jpmolin@usp.br

RESUMO

A caracterização da variabilidade espacial do solo baseada apenas na coleta de amostras georreferenciadas apresenta altos custos e confiabilidade limitada, incentivando a busca por alternativas mais eficientes. Diante disso, o objetivo do trabalho foi avaliar o potencial de imagens de satélite da vegetação nativa para auxiliar no mapeamento da variabilidade espacial de atributos do solo. Foram utilizadas imagens do satélite LANDSAT-5, sensor TM, obtidas em 1984. Foram determinados os atributos químicos do solo em 754 amostras, coletadas na profundidade de 0-0,20 m, representando uma área de 3.800 ha. A partir da imagem, calculou-se o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), que foi usado na análise de correlação linear com os atributos do solo. A análise geoestatística foi utilizada para comparar os resultados obtidos pela krigagem ordinária e pela krigagem com deriva externa, utilizando o NDVI como variável auxiliar. O coeficiente de correlação entre o NDVI e a capacidade de troca de cátions do solo (CTC) foi de 0,68. Com o uso do NDVI, o alcance do semivariograma aumentou de 1120 m para 4030 m, o que permite o uso de menores densidades amostrais. O coeficiente de determinação da validação cruzada foi de 0,44 e 0,60 para a krigagem ordinária da CTC e a krigagem com deriva externa utilizando o NDVI, respectivamente. O uso de imagens de satélite da vegetação nativa, antes da introdução de variabilidade espacial de origem antrópica, mostrou-se uma técnica eficiente para auxiliar no mapeamento de atributos do solo, principalmente os que apresentam estabilidade temporal.

PALAVRAS-CHAVE: Agricultura de Precisão, Sensoriamento Remoto, Taxa Variável.

ABSTRACT

The characterization of the spatial variability based only on soil sampling has high costs and limited reliability, encouraging the search for better alternatives. Thus, the objective of this study was to evaluate the potential of satellite imagery representing the native vegetation as an auxiliary variable in soil spatial variability mapping. We used images of Landsat-5 satellite, Thematic Mapper sensor acquired in 1984. The soil properties were determined in 754 sampling points collected from the 0-0.20 m layer, in an area of 3,800 ha. The normalized difference vegetation index (NDVI) was calculated from the image and then used in linear correlation analysis with the soil attributes. Geostatistical analysis was carried out to compare the results obtained by ordinary kriging and the kriging with external drift, using NDVI as an auxiliary variable. The correlation coefficient between NDVI and the soil cations exchange capacity (CEC) was 0.68. The use of NDVI in the geostatistical model increased the range of semivariograms from 1120 m to 4030 m, which allows the use of lower sampling density for representing the attribute of interest. The coefficient of determination of cross validation was 0.44 and 0.60 for the ordinary kriging of CEC and kriging with external drift using NDVI, respectively. The use of satellite imagery representing native vegetation, before the introduction of spatial variability of anthropogenic origin, proved to be an efficient technique to assist in the mapping of soil properties, especially those with temporal stability.

KEYWORDS: Precision Agriculture, Remote Sensing, Variable Rate Technology.

INTRODUÇÃO

O Brasil se destaca mundialmente como uma grande potência produtora na área agrícola. A crescente exigência de produzir mais com maior eficiência na área já utilizada impulsiona a busca por novas práticas de gerenciamento das lavouras. Nesse contexto a agricultura de precisão (AP) vem sendo adotada, buscando a otimização dos recursos produtivos a partir do conhecimento da variabilidade espacial. A AP preconiza que o gerenciamento das lavouras pode ser melhor conduzido se a variabilidade espacial da produtividade e dos fatores a ela relacionados forem conhecidos (MOLIN et al., 2005). Segundo Andrade et al. (2005), a caracterização da variabilidade espacial é essencial para o entendimento das inter-relações entre atributos do solo e para a adoção da AP.

No Brasil a amostragem em grade tem sido a ferramenta mais utilizada para identificar a variabilidade espacial em escala comercial. Normalmente, adota-se uma densidade amostral fixa em uma grade com pontos regularmente espaçados, onde os mapas são produzidos por processos automatizados em softwares específicos, sem o devido rigor geostatístico. Vários

trabalhos já foram realizados com objetivo de determinar o espaçamento ideal entre as amostras para caracterizar eficientemente a distribuição espacial dos atributos, porém não existe consenso quanto a essa distância. O que a maioria dos trabalhos demonstra é que a resposta depende muito da área de estudo. Cherubin et al. (2015) utilizaram sete grades amostrais partindo de 50x50 m até 200x200m para caracterizar a distribuição espacial de P e K em Latossolo Vermelho. Os autores concluíram que para caracterizar eficientemente os atributos foi necessária uma amostragem $\leq 100 \times 100$ m, havendo aumento de acurácia na medida em que se reduz a dimensão da grade amostral.

Em outro estudo Cherubin et al. (2014) avaliaram a distribuição espacial de pH, saturação por bases (V%), Ca e Mg de 30 áreas. As amostras foram coletadas utilizando três grades amostrais (10 áreas por grade), sendo: a) 100x100 m; b) 142x142 m; c) 173x173 m. Considerando os procedimentos geoestatísticos, as malhas amostrais utilizadas não foram eficientes em captar as escalas da variabilidade espacial dos atributos avaliados, podendo comprometer a acurácia das prescrições de corretivos em sítios específicos.

Por outro lado, o aumento da densidade amostral até uma densidade desejável que possa caracterizar eficientemente a distribuição espacial da maioria dos atributos químicos do solo ocasiona um aumento relevante nos custos, tornando a técnica economicamente inviável. Neste sentido, tem se intensificado a busca por alternativas de coleta de dados em alta densidade, com a qualidade necessária e custos reduzidos.

O uso de sensores remotos, proximais e de contato vem sendo foco de muitas pesquisas, pois na maioria dos casos os equipamentos não demandam preparo de amostra, não geram resíduos ao meio ambiente, trabalham com alta densidade amostral e vem apresentando redução de custo com o passar dos anos. Entre os princípios de mensuração destacam-se: a) elétricos e eletromagnéticos: condutividade/resistividade elétrica do solo; b) eletroquímicos: eletrodos íon-seletivos para determinar pH, K e nitrato; c) ópticos e radiométricos: sensores de dossel cultural e espectrômetros de reflectância (Vis-NIR) para determinar atributos de solo (GEBBERS; ADAMCHUK, 2010).

Fiorio et al. (2010) e Nanni et al. (2012), utilizaram imagens do sensor orbital TM (LANDSAT 5) contendo cenas de áreas com solo exposto para caracterizar classes de solo. A técnica mostrou-se eficiente em diferenciar solos com diferentes texturas e formados por diferentes materiais de origem. Zanzarini et al. (2013) utilizaram imagens do sensor ETM+ (LANDSAT 5) de áreas cultivadas com cana-de-açúcar buscando correlacionar alguns atributos do solo com o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI). Os resultados mostraram a existência de correlações lineares e espaciais dos teores de argila com o NDVI da

cana-de-açúcar, sugerindo que o NDVI pode ser usado para estimar o teor de argila na área estudada.

As correlações entre o NDVI de uma cultura e atributos do solo podem ser afetadas por vários fatores, principalmente por diferenças na data de estabelecimento da cultura, nas cultivares utilizadas e nas práticas de manejo adotadas, o que pode comprometer o seu potencial como variável auxiliar no mapeamento de atributos do solo. Esse problema poderia ser evitado com a utilização de imagens de satélite históricas, representando o estado da área antes da introdução de variabilidade espacial de origem antrópica. Diante disso, o objetivo desse trabalho foi avaliar o potencial de imagens de satélite da vegetação nativa como variável auxiliar no mapeamento da variabilidade espacial do solo.

MATERIAL E MÉTODOS

A área experimental está localizada no município de Jaborandi - BA, coordenadas 14° 6' 14'' S e 46° 8' 48'' O. As amostras de solo foram coletadas em 2013, na profundidade de 0-0,20 m, em densidade equivalente a um ponto a cada 5 ha, totalizando 754 pontos em uma área de 3.800 ha. As amostras foram enviadas para o laboratório para determinação dos atributos matéria orgânica do solo (MOS), pH, P (resina), K, Ca, Mg, saturação por bases (V%) e capacidade de troca de cátions (CTC).

A imagem de satélite utilizada foi obtida pelo satélite Landsat 5 equipado com sensor TM (Thematic Mapper), que foi lançado em 1984 e permaneceu em atividade até 2013, produzindo imagens em sete bandas espectrais com resolução espacial de 30 m. A cena escolhida para as análises pertence a órbita/ponto 220/070, referente ao dia 03/05/1984 (Figura 1). A opção por essa imagem deve-se à ausência de nuvens e ao fato de ser uma das imagens mais antigas disponíveis para a área de estudo.

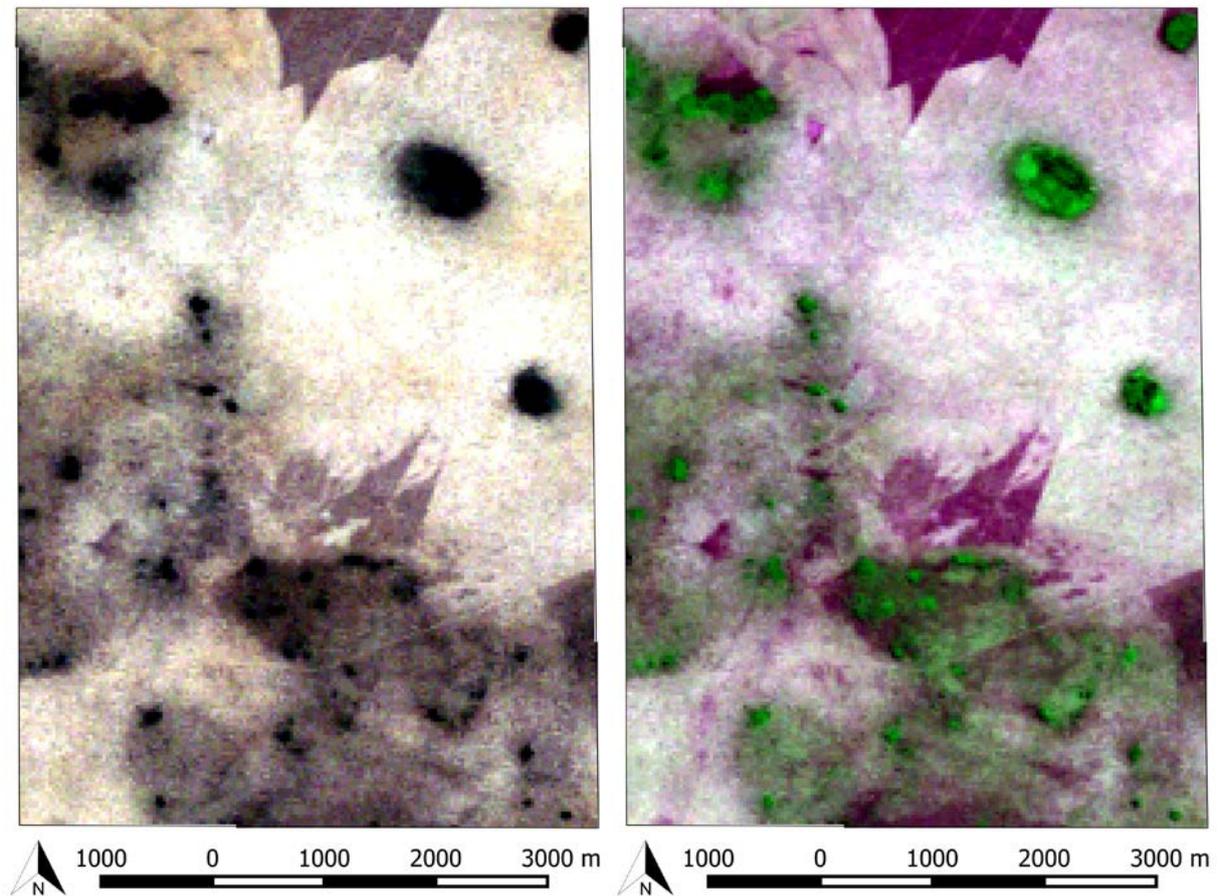
Para o cálculo do NDVI utilizou-se as bandas do vermelho (630 – 690 nm) e infravermelho próximo (760 – 900 nm), de acordo com a expressão:

$$\text{NDVI} = (\text{IVP}-\text{V}) / (\text{IVP}+\text{V})$$

Em que: NDVI é o índice de vegetação por diferença normalizada; IVP é a reflectância da banda do infravermelho próximo e V é a reflectância na banda do vermelho.

O procedimento estatístico adotado consistiu da análise de correlação linear entre o NDVI e os atributos do solo, seguida da análise geoestatística. Comparou-se o modelo geoestatístico univariado convencional, usado na krigagem ordinária (KO) dos atributos do solo, com o modelo de krigagem com deriva externa (KDE), utilizando os dados de NDVI como variável auxiliar.

Figura 1. Imagem da área de estudo em 04/05/1984 obtida pelo sensor TM do satélite Landsat 5: composição natural (esquerda) e falsa cor utilizando a banda do infravermelho próximo (direita).



Fonte: Elaborada pelos autores.

O uso da KDE substitui a cokrigagem convencional uma vez que os dados de NDVI são conhecidos em todos os pontos da área, sem a necessidade de estimá-los, o que ocorre quando se utiliza a cokrigagem. Os dois métodos foram avaliados por validação cruzada e os resultados das predições foram utilizados na confecção de mapas de distribuição espacial. Todas as análises estatísticas e geoestatísticas foram realizadas no software R v.3.1.3 (R CORE TEAM, 2015) e os mapas foram gerados no software QGIS v.2.8.1 (QGIS DEVELOPMENT TEAM, 2014).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise de correlação linear revelou que todos os atributos do solo estudados se correlacionaram com o NDVI (Tabela 1). As maiores correlações foram obtidas para a CTC e MOS, o que está relacionado a estabilidade temporal desses atributos, que mesmo após vários anos sofrem apenas pequenas alterações.

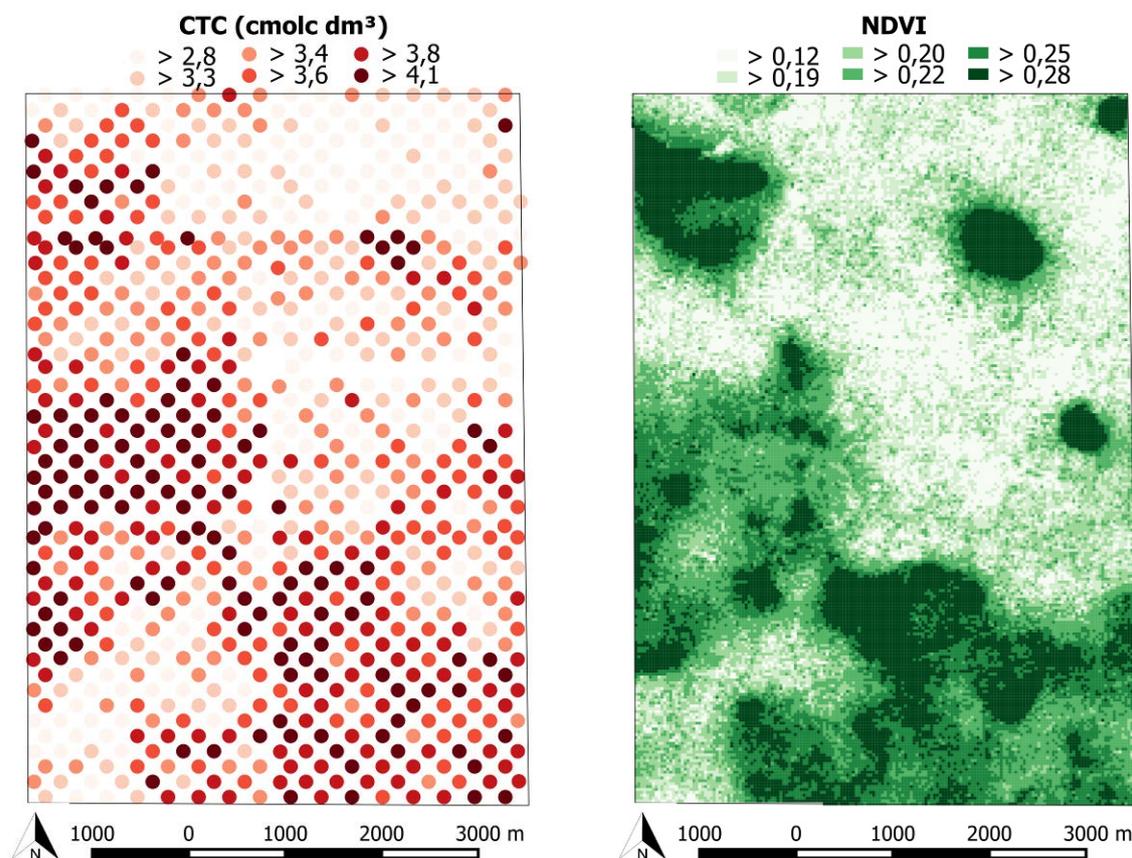
Tabela 1. Coeficiente de correlação linear entre o NDVI e atributos do solo.

| MOS ⁽¹⁾ | K | pH | P | Ca | Mg | V% ⁽²⁾ | CTC ⁽³⁾ |
|--------------------|-------|--------|--------|-------|-------|-------------------|--------------------|
| 0,580 | 0,350 | -0,567 | -0,276 | 0,338 | 0,287 | -0,385 | 0,677 |

⁽¹⁾ MOS: matéria orgânica do solo; ⁽²⁾ saturação por bases; ⁽³⁾ CTC: capacidade de troca de cátions.

Por ser o atributo com maior correlação e de grande importância na definição de práticas como calagem e adubação do solo, optou-se por apresentar a análise geoestatística somente para CTC. A CTC do solo variou entre 2,8 e 6,5 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$, com predominância de valores mais altos na região inferior direita e central esquerda do mapa (Figura 2). Os valores de NDVI variaram entre 0,12 e 0,55, indicando a presença de vegetação pouco vigorosa, característica do cerrado que ocupava a área em 1984. Analisando as duas imagens, pode-se observar uma elevada correlação espacial entre os valores de CTC e NDVI, confirmando a correlação linear de 0,677.

Figura 2. Distribuição espacial dos valores de capacidade de troca de cátions do solo (CTC) em 2013 e mapa do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) em 1984.



Fonte: Elaborada pelos autores.

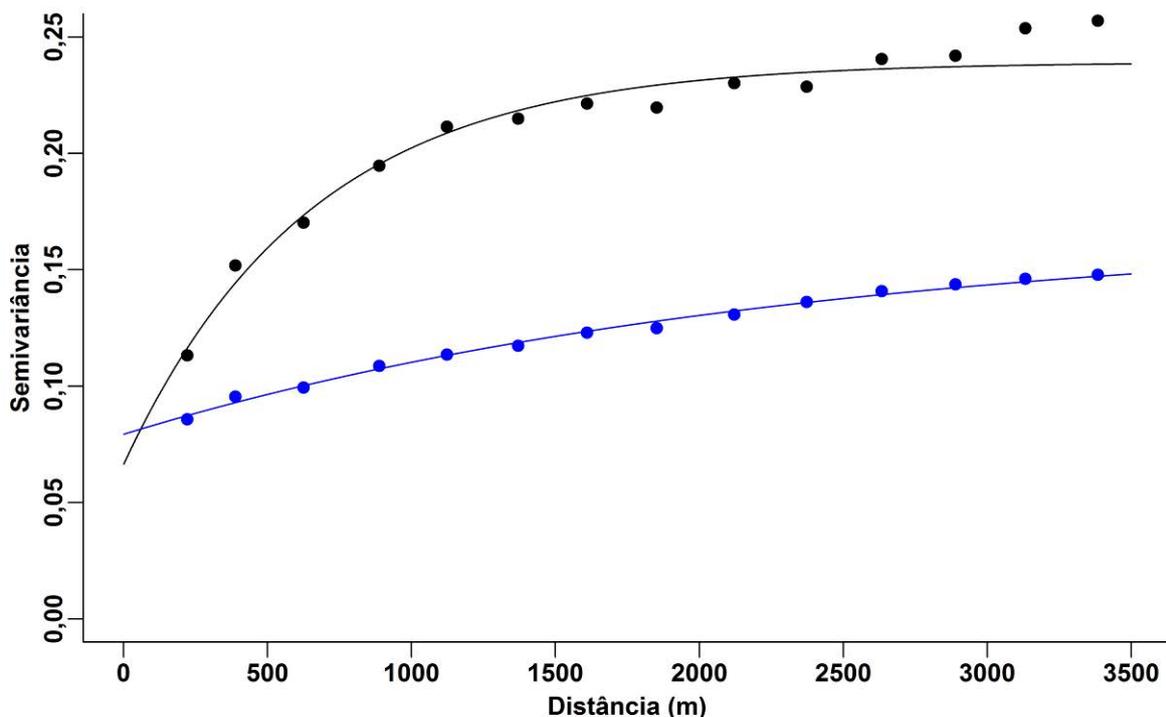
A análise geoestatística dos dados de CTC demonstrou a presença de dependência espacial, sendo ajustados a um modelo de semivariograma do tipo exponencial (Figura 3), com alcance de 1120 m, que foi utilizado na interpolação por krigagem ordinária. O efeito

pepita, que representa a variabilidade não explicada pela amostragem, atribuído a erros no processo e à variabilidade que ocorre em escala inferior à que se realizou a amostragem, representou 28 % da semivariância total.

A modelagem geoestatística para a krigagem com deriva externa considerou o NDVI como variável auxiliar e o ajuste foi realizado sobre os resíduos da estimativa da CTC pelo NDVI por regressão linear. O modelo ajustado foi do tipo exponencial, com alcance de 4030 m. Observa-se que o patamar para o semivariograma usado na krigagem com deriva externa é inferior ao do semivariograma dos dados originais e essa diferença de semivariância se refere a parte de variabilidade que foi explicada pelo NDVI.

A existência de dependência espacial nos resíduos da predição linear da CTC pelo NDVI significa que um modelo não espacial, baseado apenas no NDVI não é suficiente para representar a variabilidade espacial da área, existindo ainda a necessidade de coleta de amostras de solo. Entretanto, o maior alcance do semivariograma utilizando-se o NDVI como variável auxiliar sugere que as amostragens podem ser menos densas, quando comparadas a interpolação sem o uso de nenhuma variável auxiliar.

Figura 3. Semivariograma dos dados originais da capacidade de troca de cátions do solo (em preto) e após a inclusão do índice de vegetação por diferença normalizada como variável auxiliar (em azul).

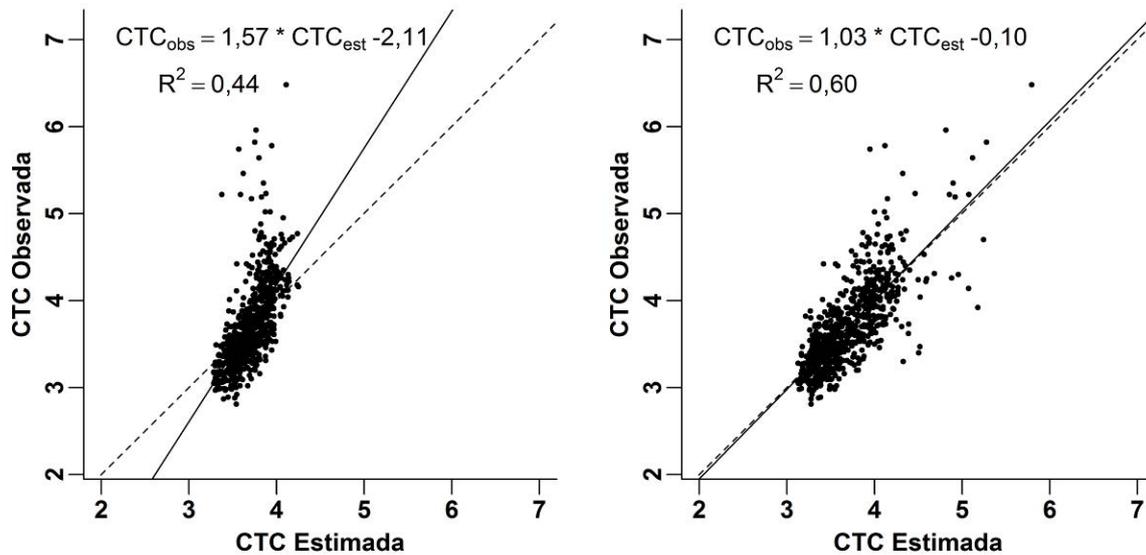


Fonte: Elaborada pelos autores.

A validação cruzada foi utilizada para comparar os resultados da interpolação pelos dois métodos e revelou desempenho superior para a krigagem com deriva externa (Figura 4).

Observa-se claramente o efeito de suavização das previsões que é característico da krigagem ordinária, o que fez com que a amplitude original da CTC de mais de 3 unidades fosse reduzida para menos de uma unidade. Esse efeito foi ainda mais intenso nos pontos com valores de CTC maiores que $4,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, causando subestimação dos valores.

Figura 4. Validação cruzada utilizando a krigagem ordinária (esquerda) e a krigagem com deriva externa (direita).



Fonte: Elaborada pelos autores.

A krigagem com deriva externa estimou os dados com uma amplitude semelhante àquela presente nos dados originais, mantendo uma relação entre os valores observados e estimados próxima da ideal, ou seja, não houve tendência de subestimação dos dados. O valor de R^2 da validação cruzada aumentou de 0,44 para 0,60, o que comprova que uma proporção maior da variabilidade foi explicada ao incluir-se o NDVI como variável auxiliar no modelo.

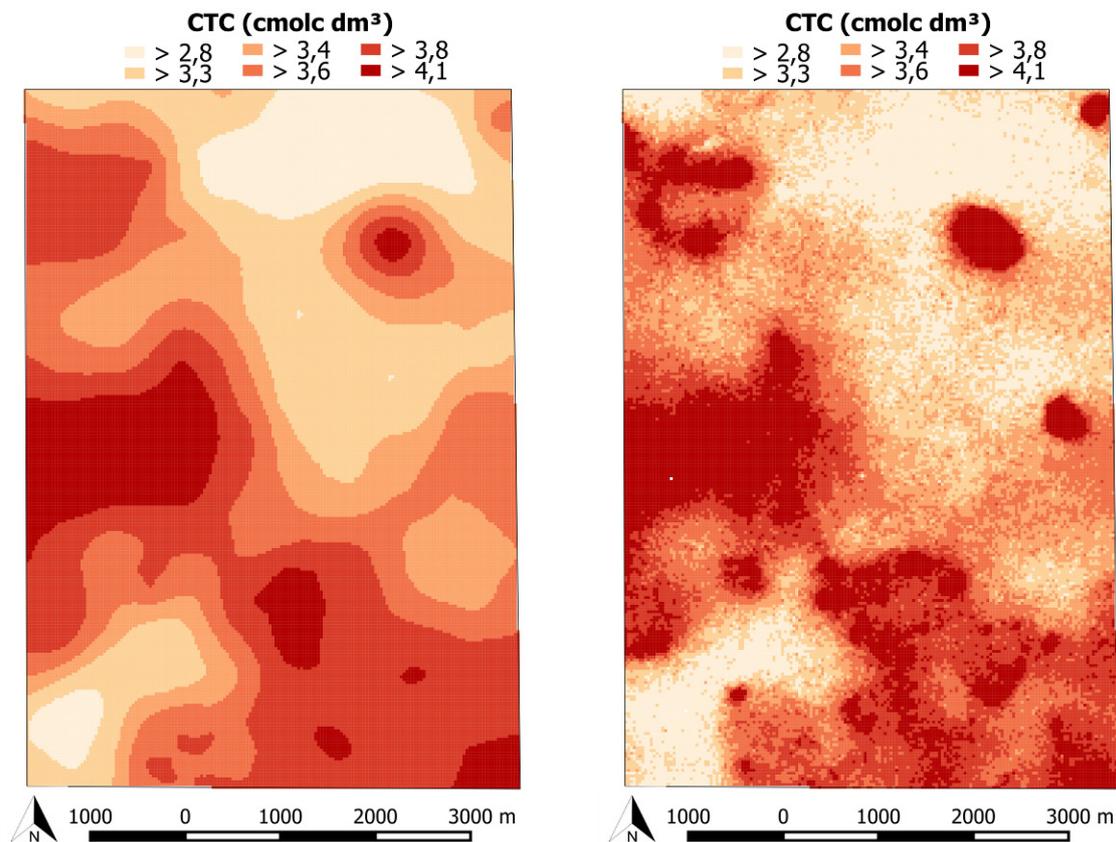
O mapa da distribuição espacial da CTC produzido pela interpolação usando a krigagem ordinária (Figura 5) exhibe padrões semelhantes aos observados para os pontos amostrais na Figura 2, com valores mais altos predominando na região central esquerda do mapa e menores valores nas regiões inferior esquerda e superior direita do mapa. O mapa da distribuição espacial da CTC produzido pela interpolação usando a krigagem com deriva externa apresenta as mesmas tendências quando observamos apenas a variabilidade em larga escala, entretanto, o grau de detalhamento é muito superior.

O mapa de krigagem ordinária se apresenta mais suavizado, com menor número de regiões ocupando as classes extremas dos valores de CTC e com a presença de classes com valores intermediários nos limites entre duas classes de valores extremos. A previsão

realizada pela krigagem com deriva externa é capaz de respeitar transições mais abruptas, além de representar manchas menores, mesmo onde não houve coleta de amostras.

A existência de correlações significativas entre o NDVI da vegetação nativa e atributos do solo, além da observação do melhor desempenho da krigagem com deriva externa em relação à krigagem ordinária, constitui uma importante ferramenta para a técnica conhecida como amostragem direcionada de solo. Os princípios desta técnica consistem do uso de alguma informação prévia da área para alocar os pontos amostrais, o que visa obter uma melhor representação da variabilidade espacial dos atributos e reduzir o número de amostras necessárias.

Figura 5. Distribuição espacial dos valores preditos da capacidade de troca de cátions do solo (CTC), utilizando a krigagem ordinária (esquerda) e a krigagem com deriva externa (direita).



Fonte: Elaborada pelos autores.

Outra possível aplicação desse tipo de imagem é na definição de unidades de gestão diferenciadas (UGD's), pois representam uma situação de equilíbrio natural, estabelecida após muitos anos de interação de complexos processos pedogenéticos (MALLARINO; WITTRY, 2004), trazendo uma informação de estabilidade temporal extremamente importante na delimitação dessas unidades. Esses resultados são especialmente importantes para as regiões

agrícolas do país que se desenvolveram a partir das décadas de 1980 e 1990, pois para esses locais existe a disponibilidade gratuita de imagens de satélite da vegetação nativa.

CONCLUSÕES

O uso de imagens de satélite da vegetação nativa mostrou-se uma técnica eficiente para caracterizar a distribuição espacial da capacidade de troca de cátions do solo demonstrando grande potencial de utilização para mapeamento de atributos que apresentam estabilidade temporal.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, A. R. S. et al. Variabilidade espacial da densidade do solo sob manejo da irrigação. In: CIÊNCIA AGROTECNOLOGIA. Minas Gerais: Lavras, v. 29, n. 2, p. 322-329, 2005.
- CHERUBIN, M. R. et al. Sampling grids used to characterise the spatial variability of pH, Ca, Mg and V% in Oxisols. Revista Ciência Agronômica, v. 45, n. 4, p. 659-672. 2014.
- CHERUBIN, M. R. et al. Dimensão da malha amostral para caracterização da variabilidade espacial de fósforo e potássio em Latossolo Vermelho. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 50, n. 2, p. 168-177, 2015.
- FIORIO, P. R. et al. Diferenciação espectral de solos utilizando dados obtidos em laboratório e por sensor orbital. Bragantia, v. 69 n. 2, p. 453-466. 2010.
- MALLARINO, A. P.; WITTRY, D. Efficacy of grid and zone soil sampling approaches for site-specific assessment of phosphorus, potassium, pH, and organic matter. Precision Agriculture, v. 5, n. 2, p. 131-144, 2004.
- MOLIN, J. P. et al. Mensuração da condutividade elétrica do solo por indução e sua correlação com fatores de produção. Revista Engenharia Agrícola, v. 25, n. 1, p. 420-426, 2005.
- NANNI, M. R. et al. Soil surface spectral data from Landsat imagery for soil class discrimination. Acta Scientiarum. Agronomy, v. 34, n. 1, p. 103-112. 2012.
- QGIS DEVELOPMENT TEAM. QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation. 2014.
- R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2015.
- ZANZARINI, F. V. et al. Correlação espacial do índice de vegetação (NDVI) de imagem Landsat/ETM+ com atributos do solo. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 17, n. 6, p. 608-614. 2013.