

DEFINIÇÃO DE ZONAS DE MANEJO A PARTIR DE MAPAS DE CONDUTIVIDADE ELÉTRICA E MATÉRIA ORGÂNICA

DEFINITION OF MANAGEMENT ZONES FROM MAPS OF ELECTRICAL CONDUCTIVITY AND ORGANIC MATTER

Sueli Martins de Freitas ALVES¹; Gracielly Ribeiro de ALCÂNTARA²;
Elton Fialho dos REIS³; Daniel Marçal de QUEIROZ⁴;
Domingos Sárvio Magalhães VALENTE⁴

1. Professora, Doutora, Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Goiás, Anápolis, GO, Brasil. suelifreitas@ueg.br; 2 Engenheira Agrícola, MsC, doutoranda da Universidade Federal de Viçosa – UFV, Viçosa, MG, Brasil; 3. Professor, Doutor, Depto Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Goiás, Anápolis, GO, Brasil; 4. Professor, Doutor, Depto Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa – UFV, Viçosa, MG, Brasil.

RESUMO: Este trabalho teve por objetivo definir zonas de manejo com base na variabilidade espacial da condutividade elétrica aparente do solo e da matéria orgânica, em áreas de plantio direto de milho e soja. Para caracterizar a variabilidade espacial foram utilizados métodos geoestatísticos. Comprovada a dependência espacial foram elaborados os mapas temáticos, por meio da krigagem. Para delimitação das zonas de manejo a partir dos mapas de variabilidade interpolados foi utilizado o algoritmo *fuzzi K-means* e para definição do número ótimo de classes foi determinado o índice de performance *fuzzi* e entropia da partição modificada. As variáveis utilizadas para a definição das zonas de manejo foram a altitude, a condutividade elétrica a 20 cm e 40 cm de profundidade e a matéria orgânica. A partir destas variáveis foram gerados sete mapas de zonas de manejo, e posteriormente pelo teste de Kappa foi analisada a concordância entre os mapas gerados pelas zonas de manejo e os mapas das propriedades físico-químicas do solo. Como resultado verificou-se o valor ótimo de número de classes igual a dois. Os melhores resultados na classificação das zonas de manejo, para os atributos referentes a textura do solo são observados a partir de mapas de matéria orgânica ou de condutividade elétrica e, para os atributos químicos, a partir de mapas de matéria orgânica ou de altitude e matéria orgânica. As zonas de manejo definidas a partir da condutividade elétrica a 20 cm permitiram detectar diferenças significativas entre as médias de produtividade de soja.

PALAVRAS-CHAVE: Geoestatística. Agricultura de precisão. Teste de kappa. Algoritmo *fuzzi k-means*.

INTRODUÇÃO

A tecnologia essencial à agricultura de precisão baseia-se na coleta de informações sobre atributos químicos e físicos dos solos, condições da cultura, do terreno e da produtividade, associando-as a sua localização, as quais podem ser expressas na forma de mapas digitais (REIS, 2005). Entender como a distribuição espacial desses atributos funciona é importante para o estabelecimento de práticas de manejo adequadas, não somente à otimização da produtividade agrícola, mas também para a minimização de possíveis danos ambientais. O uso da geoestatística permite que a estrutura da dependência espacial seja modelada e visualizada espacialmente (MENDES et al., 2008). O mapeamento dessas características depende, ainda, de grande número de amostras de solos e de custo elevado, incluída as análises laboratoriais, o que pode ser impraticável em muitas lavouras.

Os recentes avanços tecnológicos em sensores portáteis, para as medições das características de solo em escala de campo e em tempo real, têm atraído a atenção da pesquisa, na

busca pela implementação bem sucedida da agricultura de precisão. Alguns equipamentos móveis para medição da condutividade elétrica aparente (CE) no campo têm sido utilizados na agricultura. O mapeamento da CE com auxílio de GPS é uma ferramenta relativamente simples, que tem sido utilizada para estimar a textura do solo, além de outras propriedades (LUND et al., 2001; MACHADO et al., 2006).

Os países mais desenvolvidos em técnicas de amostragem em grande número vêm utilizando a CE como um indicador no monitoramento de características do solo, a qual se tornou uma das mais frequentes medições utilizada para caracterizar variabilidade do campo para aplicação em agricultura de precisão (CORWIN; LESCH, 2003). Os mapas de CE do solo é um método utilizado para determinar zonas de manejo dentro de um campo, devido ao baixo custo e agilidade de medição (SHANER et al., 2008).

Outra propriedade do solo que tem despertado demanda por sensores, devido a sua importância na qualidade do solo, do ambiente e na produtividade das culturas, é a matéria orgânica

(MO). O conteúdo de matéria orgânica normalmente é determinado em laboratório utilizando-se técnicas que medem a quantidade de carbono orgânico presente em amostras compostas de solo, através de métodos baseados na oxidação química e combustão seca. Neste sentido, atualmente tem havido demanda do conhecimento da variação espacial (e temporal) da matéria orgânica em solos de modo a permitir um maior entendimento da relação entre atributos de solo e sua influência na produtividade das culturas (MILORI et al, 2002). O uso de um sensor que permita realizar medidas diretas no solo traz a vantagem de não serem necessárias intervenções laboratoriais e da mesma forma que a CE, os mapas de MO podem ser utilizados para o estabelecimento de zonas de manejo, minimizando o número de amostras necessárias para o mapeamento das características do solo.

Neste contexto, o objetivo desta pesquisa foi definir zonas de manejo com base na variabilidade espacial da condutividade elétrica aparente do solo e da matéria orgânica em áreas de produção de milho e soja.

MATERIAL E MÉTODOS

Os dados utilizados neste trabalho são provenientes de um experimento realizado por Alcântara (2010) na fazenda Novo Horizonte, localizada no município de Gameleira de Goiás, GO, com altitude de 980 m, longitude 48° 42' e

latitude 16° 22'. A área apresenta Latossolo Vermelho-Escuro com textura média a argilosa, com declividade média variando de 1 a 5%. Na área de estudo o plantio direto vem sendo utilizado há 10 anos com plantio da cultura de soja em sucessão com milho. As amostras foram coletadas em um talhão de 22 hectares, no qual foi definida uma grade amostral de 40 x 40 m, totalizando 120 pontos (Figura 1). Todas as amostras foram georreferenciadas com a utilização de um receptor de GPS, com sistema de correção diferencial em tempo real.

As variáveis analisadas foram: pH – potencial hidrogeniônico; Ca – cálcio; Mg – magnésio; Al – alumínio; H+Al – acidez potencial; K – potássio; P – fósforo; MO – matéria orgânica; Zn – zinco; CTC- capacidade de troca catiônica; V(%) – saturação por bases; CE 20 – condutividade elétrica aparente do solo a 0,20 m de profundidade; CE 40 – condutividade elétrica aparente do solo a 0,40 m de profundidade; argila; silte; areia; densidade e umidade. Os dados de condutividade elétrica aparente do solo na configuração Matriz de Wenner a 0,20 m e a 0,40 m de profundidade foram obtidas conforme Corwin e Lesh (2005) e Valente (2010) e, foi determinada logo após a semeadura da cultura da soja, e para sua determinação foi utilizado o medidor portátil ERM-02 de fabricação da Landvise. Foram obtidas também as produtividades referentes à colheita de soja (2009/10).

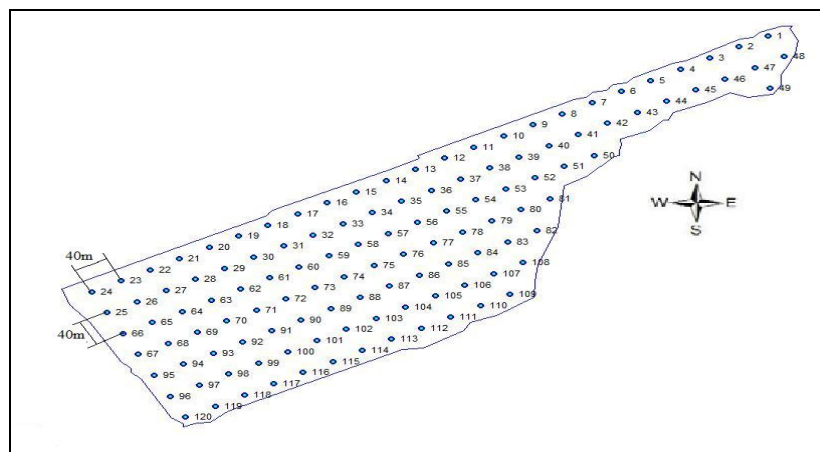


Figura 1. Grade de amostragem da área experimental, no município de Gameleira, Fazenda Novo Horizonte.

Fonte: Alcântara (2010)

Por meio da análise geoestatística foi verificado para cada variável, entre os modelos de semivariogramas, aquele que melhor se ajustou ao modelo experimental (ISAAKS; SRIVASTAVA,1989). O melhor modelo foi escolhido tendo como critério a menor soma dos

quadrados dos resíduos (SQR) e maior coeficiente de determinação (R^2). Para análise da dependência espacial foi calculado o índice de dependência espacial (IDE) definido por $[C1/(C0+C1)]*100$, em que C1 representa a variância estrutural e C0+C1 representa o patamar. Para classificação deste

índice foi utilizado o critério definido por Zimback (2001), em que a dependência espacial é considerada fraca para valores até 25%, moderada entre 25% e 75%, e forte acima de 75%.

Para cada variável, quando verificada a dependência espacial, foi elaborado o mapa de variabilidade espacial utilizando a krigagem como técnica de interpolação. A krigagem é uma técnica usada na geoestatística para estimar valores para locais não amostrados, considerando os parâmetros do semivariograma, que resulta em valores sem tendência e com variância mínima (SILVA et al., 2008).

No estudo de zonas de manejo foi utilizado o Sistema de Apoio à Decisão desenvolvido por Valente (2010) e as variáveis: alumínio trocável (Al), acidez potencial (H+Al), matéria orgânica (MO), areia, silte, argila, capacidade de troca catiônica (CTC), saturação por bases (V%), condutividade elétrica a 20 cm e condutividade elétrica a 40 cm de profundidade, que ao realizar a análise geoestatística apresentaram dependência espacial. Para a geração dos mapas de variabilidade espacial, todas as interpolações foram feitas utilizando-se um tamanho de pixel de 5x5 m para as coordenadas X e Y e mesmo polígono de contorno. Esta padronização garante que todos os mapas gerados tenham o mesmo número de pixels e possam se sobrepor.

A classificação dos mapas foi feita com o algoritmo *fuzzi K-means*, e para realizar a classificação os dados foram normalizados para média zero e variância igual a um, o número máximo de interações foi definido como sendo igual a 100 e o coeficiente *fuzzy* igual a dois.

As variáveis utilizadas para a definição das zonas de manejo foram a altitude, a condutividade elétrica a 20 cm, a condutividade elétrica a 40 cm de profundidade e a matéria orgânica. A partir destas variáveis foram gerados sete mapas de zonas de manejo com base: na altitude (ZMA), na condutividade elétrica a 20 cm (ZMCE20), na condutividade elétrica a 40 cm (ZMCE40), na matéria orgânica (ZMMO), na altitude e condutividade elétrica a 20 cm (ZMACE20), na altitude e condutividade elétrica a 40 cm (ZMACE40), na altitude e matéria orgânica (ZMAMO). Para definição do número ótimo de classes foi determinado o índice de performance fuzzy (FPI) e entropia da partição modificada (NPE). Sendo que o número ótimo de classes ocorre quando os dois índices são mínimos (SONG et al., 2009).

Para a análise de concordância entre os mapas gerados pelas zonas de manejo e as

propriedades do solo efetuou-se a tabulação cruzada entre os mapas com mesmo número de classes e os mapas de zonas de manejo, conforme metodologia apresentada por Kitchen et al. (2005). A exatidão global (Po) foi computada pela divisão da soma da diagonal principal (número de classificações corretas ou concordância real) pelo número total de amostras tomadas.

O coeficiente Kappa (Equação 1) foi determinado para avaliar a significância do desempenho da classificação, conforme Congalton e Mead (1986). O maior coeficiente Kappa entre duas classificações ocorre quando a concordância a maximizada (KITCHEN et al., 2005).

$$K = \frac{n \sum_{i=1}^c x_{ii} - \sum_{i=1}^c x_{i\otimes} x_{\otimes i}}{n^2 - \sum_{i=1}^c x_{i\otimes} x_{\otimes i}} \quad (1)$$

Em que:

K: estimativa do coeficiente Kappa;

x_{ii} : valor na linha i e coluna i;

$x_{i\otimes}$: soma de linhas i da matriz de confusão;

x_{\otimes} : soma das colunas i da matriz de confusão;

n: número total de amostras;

c: número total de classes.

Por meio de um teste estatístico (Equação 2) verificou-se a significância das diferenças entre dois ou mais classificadores (representado pelas suas respectivas matrizes de confusão) usando-se a análise do coeficiente de Kappa, conforme Congalton e Mead (1986), comparou-se as grandezas do mapa de referência e as do mapa de classificação. O grau de concordância entre imagens, em função do índice de Kappa permite obter uma classificação qualitativa do grau de concordância, conforme definido por Landis e Koch (1977).

$$Z = \frac{|k_{a1} - k_{a2}|}{\sqrt{\sigma_{ka1}^2 + \sigma_{ka2}^2}} \quad (2)$$

Em que:

k_{a1} e k_{a2} : são os dois coeficientes Kappa que estão sendo comparados;

σ_{ka1}^2 e σ_{ka2}^2 : são as respectivas variâncias dos coeficientes Kappa.

Após a definição das zonas de manejo utilizou-se os dados originais de cada variável em estudo e foram calculadas as medidas descritivas como média e desvio-padrão para cada zona de manejo. Para verificar a existência de diferença

significativa entre as médias foi utilizado o teste de t a 5% de probabilidade, usando o software R.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A agricultura de precisão é um sistema de manejo agrícola que reconhece a existência da variabilidade no campo, onde a aplicação de fertilizantes e pesticidas é diferenciada entre zonas de manejo, áreas consideradas homogêneas que recebem o mesmo tratamento em toda sua extensão (CORÁ et al., 2004). Trata-se de um gerenciamento agrícola em que parte do registro georreferenciado de informações de solo e de culturas se completam com intervenções de manejo localizado (AMADO; SANTI, 2007).

Com o objetivo de definir zonas de manejo, primeiramente foi realizada uma análise exploratória das variáveis: CE20, CE40, Argila, Silte, Areia, AL, H+AL, V%, Ca, Mg, P, K, Zn, MO, densidade e umidade, a fim de identificar dados discrepantes ou extremos. O critério utilizado para identificação de dados discrepantes foi o proposto por Tukey (1977).

A partir da análise exploratória dos dados e eliminação dos dados discrepantes, a geoestatística

foi utilizada para estudar a variabilidade espacial, bem como para a escolha do modelo de semivariograma que melhor descrevesse a variabilidade dos atributos estudados, conforme descrito Isaaks e Srivastava (1989).

Após a análise geoestatística (Tabela 1), verificou-se que o índice de dependência espacial para MO (0,51) e MO CE20 (0,50) são consideradas moderadas e a CE40 (0,91) é considerada forte, segundo a classificação de Zimback (2001). Segundo Cambardella et al. (1994), os atributos que apresentam forte dependência espacial são mais influenciados por propriedades intrínsecas do solo, notadamente a textura e a mineralogia, enquanto os que apresentam fraca dependência são mais influenciados por fatores externos, como aplicações de fertilizantes e sistemas de preparo e cultura, ou seja, estão relacionados com o manejo do solo. Estes resultados são semelhantes aos encontrados por Faulin et al. (2005) e por Valente (2010), os quais determinaram IDE para a condutividade elétrica, que variaram de 37% a 95% e 45 a 52%, respectivamente.

Tabela 1. Modelos teóricos de semivariância ajustados para CE20, CE40 e propriedades do solo para a Fazenda Novo Horizonte.

Atributos	Modelo	A	C ₀ +C	C ₀	IDE	R ²	SQR	VC
Argila(g.kg ⁻¹)	Exponencial	2805,00	4573,00	1582,00	0,65	0,89	126296	0,99
Silte (g.kg ⁻¹)	Exponencial	528,30	110,70	55,30	0,50	0,90	216,00	0,92
Areia (g.kg ⁻¹)	Esférico	410,40	2996,00	1395,00	0,53	0,90	326134	0,90
pH CaCl ₂	EPP*	-	-	-	-	-	-	-
Ca (cmolc.dm ⁻³)	Exponencial	121,20	0,45	0,064	0,86	0,72	9,12E-03	0,66
Mg (cmolc.dm ⁻³)	EPP*	-	-	-	-	-	-	-
Al (cmolc.dm ⁻³)	Gaussiano	2057,68	0,005	0,0003	0,94	0,97	8,09E-08	0,96
H+Al (cmolc.dm ⁻³)	Exponencial	3032,70	0,79	0,14	0,82	0,83	0,01	1,14
K (mg.dm ⁻³)	EPP*	-	-	-	-	-	-	-
P (mg.dm ⁻³)	EPP*	-	-	-	-	-	-	-
MO (g.dm ⁻³)	Esférico	138,30	57,83	28,04	0,52	0,80	90,10	0,95
Zn (mg.dm ⁻³)	EPP*	-	-	-	-	-	-	-
CTC (cmolc.dm ⁻³)	EPP*	-	-	-	-	-	-	-
V (%)	Gaussiano	1390,84	440,90	65,00	0,853	0,96	4919,00	1,04
CE 20 (mS.m ⁻¹)	Esférico	402,70	0,85	0,42	0,50	0,92	0,018	0,91
CE 40 (mS.m ⁻¹)	Exponencial	155,40	0,41	0,04	0,91	0,88	5,923E-3	0,73

pH – potencial hidrogeniônico; Ca – cálcio; Mg – magnésio; Al – alumínio; H+Al – acidez potencial; K – potássio; P – fósforo; MO – matéria orgânica; Zn – zinco; CTC - capacidade de troca catiônica a pH 7; V% – saturação por bases; A – alcance; C+C₀ – patamar; C₀ – efeito pepita; IDE – Índice de Dependência Espacial. VC – coeficiente de regressão da validação cruzada; R² - coeficiente de determinação e SQR – soma dos quadrados dos resíduos. EPP* – Efeito Pepita Puro. Fonte: Alcântara (2010).

Visando verificar o grau de associação entre as variáveis que apresentaram dependência espacial foi calculado o coeficiente de correlação de Pearson. De acordo com os resultados

apresentados verificou-se que a CE20 não apresenta correlação linear com a variável matéria orgânica, apresenta uma correlação moderada (0,70) com a CE40 e fraca com as demais variáveis. O mesmo acontece com a CE40. A matéria

orgânica apresenta uma correlação fraca com argila (-0,47), silte (-0,41), areia (0,46), cálcio (0,46), alumínio (-0,25), acidez potencial (-0,42), saturação por base (0,48) e CTC (0,37).

Williams & Hoey (1987), em estudos realizados no Sudeste da Austrália, obtiveram alta correlação entre a CE e o teor de argila. Outros autores como Machado et al. (2006), também obtiveram forte correlação entre condutividade elétrica e teor de argila e mostram que a CE medida por sensor de contato reflete adequadamente a variação nos teores de argila do Latossolo Vermelho distroférico sob plantio direto, para uso na definição de zonas de manejo. Contudo, Valente (2010) obteve correlação baixa entre a condutividade elétrica aparente do solo e a argila. Segundo o autor, quando a área apresenta alta variabilidade no teor de argila, geralmente, há forte correlação entre essa propriedade e a condutividade elétrica aparente do solo. A CE varia com uma série de fatores sendo que os quatro principais são a umidade do solo, a percentagem de argila, o tipo de argila e a concentração iônica na solução do solo. Para valores aproximadamente idênticos de umidade e salinidade do solo, quanto mais elevado for o teor de argila maior será a CE. A possibilidade de mapear uma variável relacionada com o teor de argila torna-se extremamente importante dada a sua relação com características do solo como a capacidade de troca catiônica e capacidade de retenção de água. Segundo Machado et al. (2006), o mapa da CE reflete suficientemente a variação espacial dos teores de argila para uso na delimitação de zonas de manejo e que os resultados de CE em solos mais argilosos são, em geral, mais altos do que em solos arenosos. No entanto, Serrano et al. (2010) não encontrou correlação significativa entre a CE e o teor de argila no solo.

Segundo Valente (2010), alguns pesquisadores têm demonstrado a importância desempenhada pelas variáveis elétricas do solo para explicar a variabilidade das suas propriedades físico-químicas e da produtividade agrícola. A condutividade elétrica aparente do solo tornou-se uma das ferramentas mais utilizadas em medições de caracterização da variabilidade espacial do campo, devido a sua facilidade de medição e confiabilidade. Lesch et al. (2005), discutem que as informações derivadas de dados de pesquisa da CE podem ser usadas para definição de zonas de manejo nas áreas agrícolas.

Conceição et al. (2005) relataram que a matéria orgânica (MO) tem sido sugerida como um indicador-chave da qualidade do solo, considerando sua influência nos demais atributos essenciais para

que o solo desempenhe suas funções. Para Islam & Weil (2000), os indicadores que demonstram uma crítica influência da capacidade do solo em desempenhar suas funções, são: agregação, carbono orgânico total e ativo. Segundo Ciotta et al. (2003), a capacidade de troca de cátions aumenta com o teor de matéria orgânica, qualidade e teor de argila. Em solos tropicais e subtropicais, a matéria orgânica apresenta uma estreita relação com as demais propriedades físicas, químicas e biológicas do solo. Portanto, o manejo sustentável da matéria orgânica do solo é fundamental à manutenção da capacidade produtiva do solo em longo prazo.

Na definição do número de classes para o estabelecimento das zonas de manejo foi utilizado o sistema de apoio a decisão desenvolvido por Valente (2010). O algoritmo *fuzzi k-means* é aplicado nos dados dos mapas interpolados por meio da krigagem, realizando o zoneamento automaticamente formando agrupamentos de dados semelhantes, sem o viés da escolha arbitrária da divisão empírica das classes (FRIDGEN et al., 2004). Este algoritmo minimiza a soma de quadrado dos erros dentro de cada classe e exige que o usuário escolha o número inicial de zonas de manejo que deseja trabalhar e, de uma forma interativa, os dados são agrupados para a classe mais próxima pelo critério da mínima distância. A cada interação os dados são reagrupados e o processo se repete até a estabilização dos resultados. Valente (2010) destaca que o algoritmo *fuzzi k-means* não leva em consideração as coordenadas das variáveis durante o processo de classificação, o que Pedroso et al. (2010) destacam como fator limitante deste algoritmo.

Na Figura 2 são apresentadas as zonas de manejo com base nos mapas de: condutividade elétrica a 20 cm (ZMCE20), condutividade elétrica a 40 cm (ZMCE40) e matéria orgânica (ZMMO), classificadas em duas, três, quatro e cinco zonas de manejo. Também foram elaborados mapas com base na altitude e condutividade elétrica a 20 cm (ZMACE20), na altitude e condutividade elétrica a 40 cm (ZMACE40), na altitude e matéria orgânica (ZMAMO). Visualmente verifica-se que conforme aumenta o número de classes, as áreas vão se tornando mais irregulares e, segundo Tisseyre e McBratney (2008), pequenas zonas de manejo são impossíveis de serem manejadas devido a limitações técnicas e econômicas. Para auxiliar na definição do número de zonas de manejo a serem recomendadas foram calculados os índices de performance *fuzzi* (FPI) e entropia da classificação normalizada (NCE) por zonas de manejo definidas a partir do mapa de variabilidade espacial de cada

variável utilizada na definição das zonas de manejo.

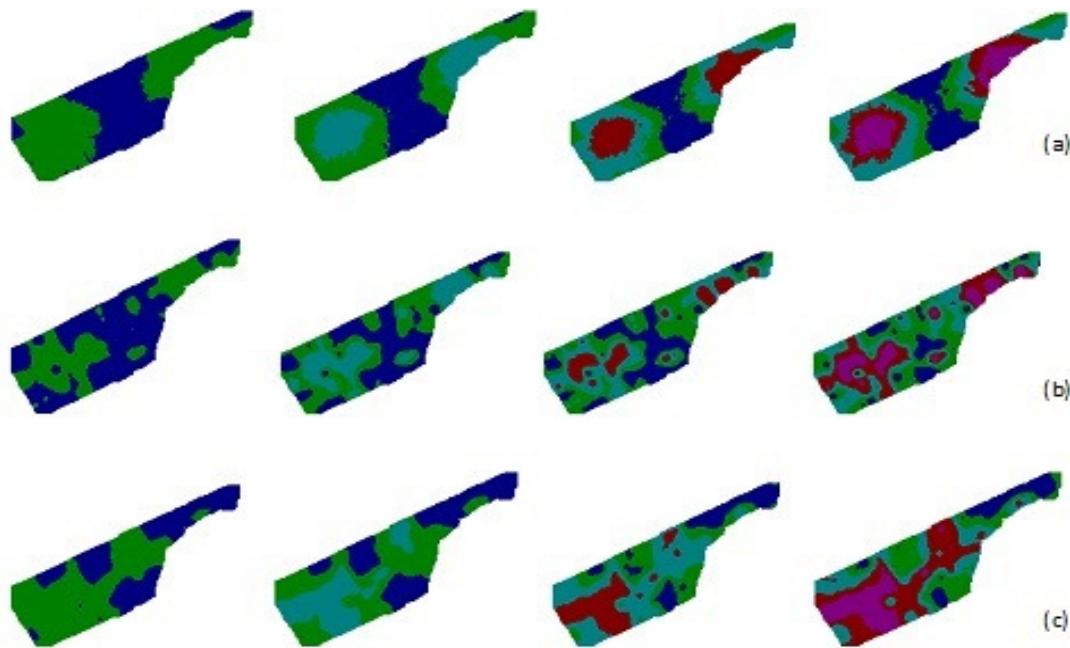


Figura 2. Zonas de manejo definidas a partir do mapa de variabilidade espacial para (a) CE20 (ZMCE20), (b) CE40 (ZMCE40) e (c) MO (ZMMO) em duas, três, quatro, e cinco classes.

Os resultados gráficos dos dois índices para as zonas de manejo definidas estão apresentados na Figura 3 e verifica-se que os índices não coincidem em um número único de classes. Sendo assim, a decisão final de quantas classes deve ser recomendada depende de uma análise adicional como, por exemplo, comparar zonas de manejo definidas com diferentes variáveis de entrada para determinar quais são as mais importantes, conforme sugerido por Fridgen et al. (2004).

A comparação de mapas é uma etapa muito importante no processo de identificação de zonas de manejo e, Carvalho et al. (2002), alertam que se não houver um critério para determinar similaridade ou dissimilaridade entre esses mapas essa comparação será subjetiva.

Como análise adicional neste estudo, visando avaliar quais variáveis de entrada foram as mais importantes para se definir as zonas de manejo, foram realizadas também, as análises de concordâncias, por meio do índice Kappa (Figura 4) para cada variável utilizada na definição das zonas de manejo (A, CE20, CE40, MO, ACE20, ACE40, AMO) em relação às propriedades do solo (areia, silte, argila, Ca, Al, H+Al, V% e CTC) classificadas em duas e três classes. A divisão da área em duas zonas de manejo foi a que apresentou

melhores resultados, pois os valores do índice Kappa, bem como o acerto global, apresentaram uma tendência a diminuir quando aumenta o número de classes. Considerando o valor ótimo de número de classes igual a dois, observou-se que para os atributos referentes à textura do solo a ZM MO e ZM CE20 e para os atributos químicos a ZM MO e ZM AMO apresentaram os melhores resultados na sua classificação. Nas duas situações o índice Kappa foi maior do que 0,40 e o acerto global acima de 70%. Assim, as variáveis recomendadas para definir as zonas de manejo, na área estudada, são a CE20 ou MO ou altitude e MO. Os resultados obtidos neste trabalho, para o índice Kappa são semelhantes aos encontrados por Kitchen et al. (2005) e Valente (2010), ou seja, variou de ruim a bom.

Não foi verificado ganho com a utilização de variáveis em conjunto para a definição de zonas de manejo, o que difere do encontrado por Kitchen et al. (2005) e Valente (2010). Segundo os autores, a utilização de diferentes variáveis em conjunto apresenta resultados mais satisfatórios na classificação do solo para recomendação de corretivos e fertilizantes, no caso as variáveis são condutividade elétrica e altitude.

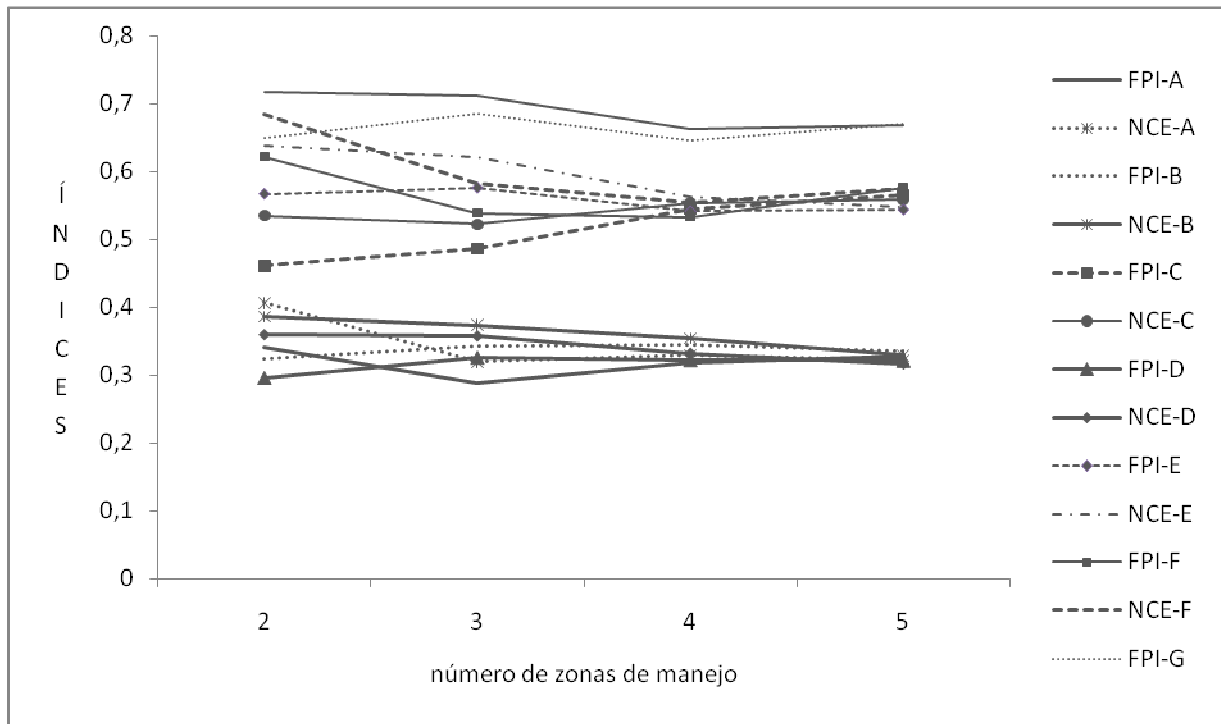


Figura 3. Índice de performance *fuzzi* (FPI) e entropia da classificação normalizada (NCE) por zonas de manejo definidas a partir do mapa de variabilidade espacial para (A) condutividade elétrica a 20 cm (ZMCE20), (B) condutividade elétrica a 40 cm (ZMCE40), (C) condutividade elétrica a 20 cm e a 40 cm (ZMCE20CE40), (D) matéria orgânica (ZMMO), (E) matéria orgânica e condutividade elétrica a 20 cm (ZMACE20), (F) matéria orgânica e condutividade elétrica a 20 cm, (G) matéria orgânica e condutividade elétrica a 20 cm e a 40 cm.

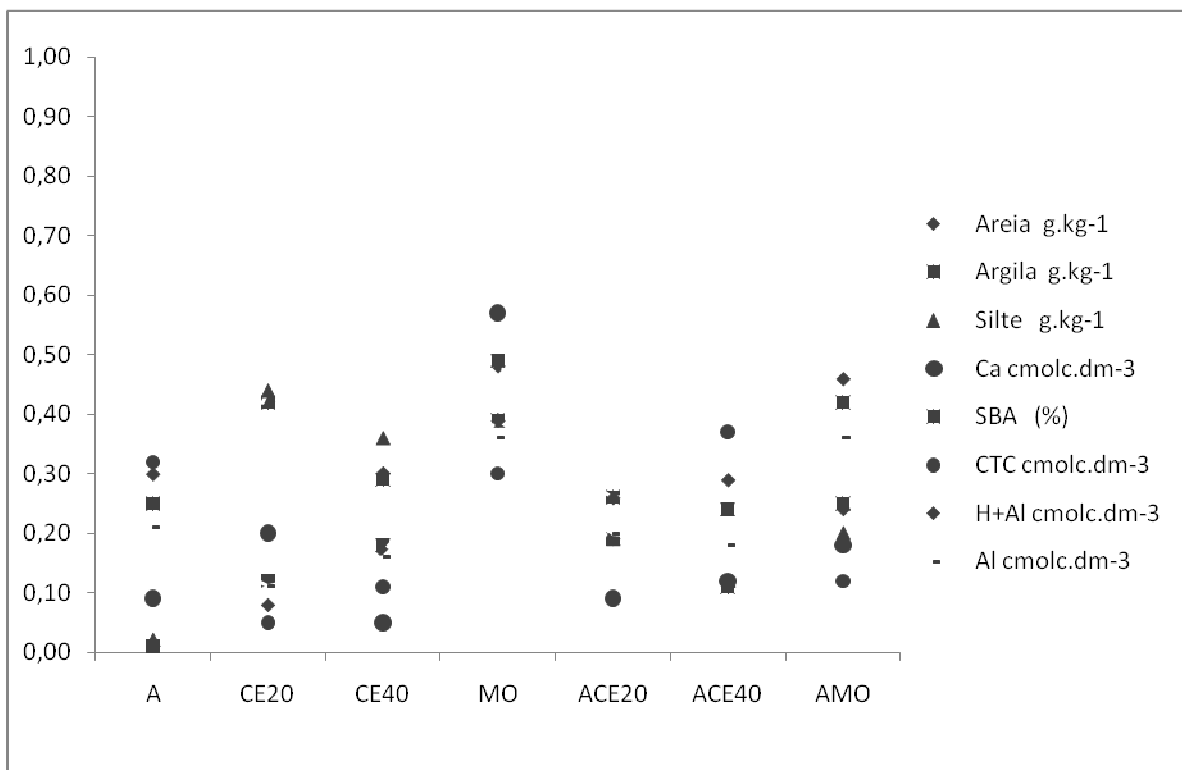


Figura 4. Índice de Kappa para a classificação das propriedades do solo com as zonas de manejo em duas classes.

Para verificar se as duas zonas de manejo definidas a partir das variáveis CE20 e MO apresentaram diferença significativa entre as médias das propriedades físico-químicas do solo e produtividade, foi realizado o teste de t (Tabela 2). Verifica-se que as duas zonas de manejo delineadas pelo mapa de condutividade elétrica apresentaram diferenças significativas para sete das 16 variáveis em estudo. Neste caso, a ZM1 apresentou um solo com maior teor de areia, maior teor de cálcio, magnésio e saturação por bases. A ZM2 apresentou

solo com maior teor argila e uma maior produtividade da soja. As zonas de manejo delineadas pela matéria orgânica apresentaram diferenças significativas em 10 variáveis, sendo que a ZM1 se caracterizou por apresentar um solo com maior teor de areia, maior teor de cálcio, magnésio, pH, matéria orgânica, capacidade de troca catiônica e saturação por bases. Contudo, esta zona de manejo não conseguiu detectar diferenças significativas para a produtividade da soja.

Tabela 2. Comparação das propriedades físico-químicas do solo e produtividade entre as zonas de manejo (ZM) em duas classes.

Atributos	ZM CE20			ZM MO	
	ZM	N	Média*	N	Média*
Argila(g.kg ⁻¹)	1	71	28,63 ^b	70	28,53 ^b
	2	49	32,12 ^a	50	32,20 ^a
Silte (g.kg ⁻¹)	1	71	7,79 ^b	70	7,83 ^b
	2	49	8,57 ^a	50	8,50 ^a
Areia (g.kg ⁻¹)	1	71	63,58 ^a	70	63,64 ^a
	2	49	59,31 ^b	50	59,30 ^b
pH_CaCl2	1	71	5,75 ^a	70	5,81 ^a
	2	49	5,61 ^a	50	5,51 ^b
Ca (cmolc.dm ⁻³)	1	71	3,14 ^a	70	3,24 ^a
	2	49	2,79 ^b	50	2,66 ^b
Mg (cmolc.dm ⁻³)	1	71	1,16 ^a	70	1,20 ^a
	2	49	1,06 ^a	50	1,00 ^b
Al (cmolc.dm ⁻³)	1	71	0,01 ^a	70	0,00 ^b
	2	49	0,01 ^a	50	0,02 ^a
K (mg.dm ⁻³)	1	71	99,61 ^a	70	100,91 ^a
	2	49	93,88 ^b	50	92,16 ^a
MO (g.dm ⁻³)	1	71	5,15 ^a	70	5,58 ^a
	2	49	4,85 ^a	50	4,24 ^b
CTC (cmolc.dm ⁻³)	1	71	6,73 ^a	70	6,80 ^a
	2	49	6,46 ^a	50	6,37 ^b
V (%)	1	71	67,04 ^a	70	68,54 ^a
	2	49	62,32 ^b	50	60,31 ^b
Produção soja (kg.ha ⁻¹)	1	71	3131,20 ^b	70	3195,20 ^a
	2	49	3355,20 ^a	50	3261,10 ^a

ZMCE20 – zona de manejo a partir da condutividade elétrica a 20 cm; ZMMO zona de manejo a partir da matéria orgânica; pH – potencial hidrogeniônico; Ca – cálcio; Mg – magnésio; Al – alumínio; H+AL – acidez potencial; K – potássio; P – fósforo; MO – matéria orgânica; Zn – zinco; CTC a 7%- capacidade de troca catiônica; V – saturação por bases. * - médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de t a 5% de probabilidade.

CONCLUSÕES

As zonas de manejo que melhor classificaram os atributos referentes a textura do solo foram as definidas a partir de mapas de matéria orgânica ou de mapas de condutividade elétrica.

As zonas de manejo que melhor classificaram os atributos químicos foram a partir de mapas de matéria orgânica em conjunto com o mapa de altitude.

As zonas de manejo definidas a partir de mapas de condutividade elétrica do solo a 20 cm e de mapas de matéria orgânica do solo, detectaram diferenças significativas entre as médias dos

atributos avaliados das propriedades físico-químicas do solo e produtividade, em 44% e em 66% destes atributos, respectivamente.

A condutividade elétrica do solo e a matéria orgânica podem ser utilizadas como indicadores de variabilidade de propriedades do solo.

AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão de bolsa de estudo ao primeiro autor, por meio do Programa de cooperação acadêmica - Procad.

ABSTRACT: This study aimed to define management zones based on spatial variability of soil apparent electrical conductivity and organic matter in areas of tillage. To characterize the spatial geostatistical methods were used. Proven spatial dependence was prepared thematic maps through kriging. For delineation of management zones based on maps of variability was interpolated using the Fuzzy K-means algorithm and to define the optimal number of classes was determined Fuzzy performance index and entropy of the partition changed. The variables used for defining management zones were altitude, the electrical conductivity at 20 cm and 40 cm depth and organic matter. From these seven variables were generated maps of management zones, and later by the Kappa test was analyzed the correlation between the maps generated by the management zones and maps of the physical and chemical properties of soil. As a result there was an optimum number of classes equal to two, with the attributes related to soil texture management zone maps from organic matter or electrical conductivity and the chemical zone management from maps of organic matter or organic matter and altitude showed better results in their classification. The management zones defined from the electrical conductivity at 20 cm allowed us to detect significant differences between the average yield of soybean.

KEYWORDS: Geostatistics. Precision Agriculture. Kappa test. Fuzzy k-means algorithm

REFERÊNCIAS

- ALCÂNTARA, R. G. **Variabilidade espacial de características físico-químicas e a condutividade elétrica aparente do solo sob plantio direto**. Anápolis, 2010, 89f. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de Goiás, 2010.
- AMADO, T. J. C.; SANTI, A. L. Agricultura de precisão aplicada ao aprimoramento do manejo do solo. In: FIORIN, J. E., ed. **Manejo da fertilidade do solo no sistema plantio direto**. Passo Fundo, Berthier, 2007. p.99-144.
- CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVAK, J. M.; PARKIN, T. B.; KARLEN, D. L.; TURCO, R. F. & KONOPKA, A. E. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil Science Society America Journal**, v. 58, p. 1501-1511, 1994.
- CARVALHO J. R. P.; VIEIRA S. R.; MORAN R. C. C. P. Análise de correspondência – uma ferramenta útil na interpretação de mapas de produtividade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, p. 435-443, 2002.
- CIOTTA, M. N.; BAYER, C.; FONTOURA, S. M. V.; ERNANI, P. R.; ALBUQUERQUE, J. A. Matéria orgânica e aumento da capacidade de troca de cátions em solo com argila de atividade baixa sob plantio direto. **Ciência Rural**, v. 33, n. 6, p. 1161-1164, 2003.

CONCEIÇÃO, P. C.; AMADO, T. J. C.; MIELNICZUK, J.; SPAGNOLLO, E. Qualidade do solo em sistemas de manejo avaliada pela dinâmica da matéria orgânica e atributos relacionados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 5, 2005.

CONGALTON, R. G.; MEAD, R. A. A review of discrete multivariate analysis techniques used in assessing the accuracy of remotely sensed data from error matrices. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.24, p.169-174, 1986.

CORÁ, J. E.; ARAUJO, A. V.; PEREIRA, G. T.; BERALDO, J. M. G. Variabilidade espacial de atributos do solo para adoção do sistema de agricultura de precisão na cultura de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 1013-1021, 2004.

CORWIN, D. L.; S. M. LESCH. Application of soil electrical conductivity to precision agriculture: theory, principles, and guidelines. **Agronomy Journal**. v. 95, p. 471-471, 2003.

CORWIN, D. L.; LESCH, S. M. Apparent soil electrical conductivity measurements in agricultural. **Computers and Electronics in Agriculture**. v. 46, p. 11-43, 2005.

FAULIN, G. D. C.; MOLIN, J. P.; MAGALHÃES, R. P. Variabilidade espacial do teor de água e sua influência na condutividade elétrica do solo. **Anais do XXXIV Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola**, Canoas, RS, 2005.

FRIDGEN, J. J.; KITCHEN, N. R.; SUDDUTH, K. A.; DRUMMOND, S. T.; WIEBOLD, W. J.; FRAISSE, C.W.. Management Zone Analyst (MZA): software for sub-field management zone delineation. **Agronomy Journal**, v. 96, p. 100-108, 2004.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **An introduction to applied geostatistics**. Oxford University Press, Inc, New York, NY, 1989.

ISLAM, K. R.; WEIL, R. R. **Soil quality indicator properties in mid-atlantic soils as influenced by conservation management**. *J. Soil Water Conser.*, v. 55, p. 69-78, 2000.

KITCHEN, N. R.; SUDDUTH, K. A.; MYERS, D. B.; DRUMMOND, S. T.; HONG, S. Y. Delineating productivity zones on claypan soil fields using apparent soil electrical conductivity. **Computer and Electronics in Agriculture**, v. 46, p. 285-308, 2005.

LANDIS, J.; KOCH, G. The measurement of observer agreement for categorical data. **Biometrics**, Washington, v. 33, p. 159-74, 1977.

LESCH, S. M.; CORWIN, D. L.; ROBINSON, D. A. Apparent soil electrical conductivity mapping as an agricultural management tool in arid zone soils. **Computer and Electronics in Agriculture**, v. 46, p. 351-378, 2005.

LUND, E. A.; WOLCOTT, M. C.; HANSON, G. P. Applying nitrogen site-specifically using soil electrical conductivity maps and precision agriculture technology. **Scientific World**, v. 1, p. 767-776, 2001.

MACHADO, P. L. O. A.; BERNARDI, A. C. C.; VALÊNCIA, L. I. O.; MOLIN, J. P.; GIMENEZ, L. M.; SILVA, C.A.; ANDRADE, A.G.A.; MADARI, B.E.; MEIRELLES, M.S.P.M. Mapeamento da condutividade elétrica e relação com a argila de latossolo sob plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília, v. 41, n. 6, p.1 023-1031, 2006.

MENDES, A. M. S.; FONTES, R. L. F.; OLIVEIRA, M. Variabilidade espacial da textura de dois solos do Deserto Salino, no Estado do Rio Grande do Norte. **Revista Ciência Agronômica**. v. 39, p. 19-27, 2008.

- MILORI, D. M. B. P.; NETO, L. M.; BAYER, C. **Desenvolvimento de uma metodologia baseada na técnica fotoacústica para determinar porosidades em membranas vítreas porosas**. São Carlos: [Embrapa Instrumentação Agropecuária], 2002. 18 p.
- PEDROSO, M.; TAYLOR, J.; TISSEYRE, B.; CHARNOMORDIC, B.; GUILLAUME, S. A segmentation algorithm for the delineation of agricultural management zones. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 70, p. 199-208, 2010.
- REIS, L. R. **Utilização da condutividade elétrica para estabelecimento de zonas de manejo em um latossolo amarelo-escuro**. Viçosa, 2005. 58f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa. 2005.
- SERRANO, J. M.; PEC, J. O.; SILVA, J. R. M., SHAIDIAN, S. Mapping soil and pasture variability with an electromagnetic induction sensor. **Computers and Electronics in Agriculture**. v. 73, p. 7–16, 2010.
- SHANER, D. L.; FARAHANI, H. J.; BUCHLEITER, G. W. Predicting and Mapping Herbicide–Soil Partition Coefficients for EPTC, Metribuzin, and Metolachlor on Three Colorado Fields. **Weed Science**. v. 56, p. 133–139, 2008.
- SILVA, F. M.; SOUZA, Z. M.; FIGUEIREDO, C. A. P.; VIEIRA, L. H. S.; OLIVEIRA, E. Variabilidade espacial de atributos químicos e produtividade da cultura do café em duas safras agrícolas. **Ciência Agrotecnologia**. v. 32, p. 231-241, 2008.
- SONG, X.; WANG, J.; HUANG, W.; LIU, L.; YAN, G.; PU, R. The delineation of agricultural management zones with high resolution remotely sensed data. **Precision Agriculture**, v. 10, p. 471-487, 2009.
- WILLIAMS, B.G.; HOEY, D. The use of electromagnetic induction to detect the spatial variability of the salt and clay content of soils. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v. 25, n. 1, p. 21-7, 1987.
- TISSEYRE, B.; MCBRATNEY, A. B. A technical opportunity index based on mathematical morphology for site-specific management: an application to viticulture. **Precision Agriculture**, v. 9, n. 1-2, p. 101–113, 2008.
- TUKEY, J. W. **Exploratory Data Analysis**. Addison-Wesley, Reading, MA. 1977.
- VALENTE, D. S. M. **Desenvolvimento de um sistema de apoio à decisão para definir zonas de manejo em cafeicultura de precisão**. Viçosa, 2010, 104f. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Viçosa. 2010.
- ZIMBACK, C. R. L. **Análise espacial de atributos químicos de solos para fins de mapeamento da fertilidade**. 2001. 114f. Tese (Livre-Docência em Levantamento do solo e fotopedologia) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, SP, 2001.