

Lógica fuzzy na avaliação da fertilidade do solo e produtividade do café conilon¹

Fuzzy logic for evaluation of the fertility of soil and productivity of conilon coffee

Samuel de Assis Silva^{2*}, Julião Soares de Souza Lima³, Gustavo Soares de Souza⁴, Rone Batista de Oliveira⁵ e Alexandre Cândido Xavier⁶

Resumo - O objetivo deste estudo foi analisar, utilizando a geoestatística e o sistema de classificação fuzzy, a fertilidade de uma área experimental com base em atributos químicos do solo e sua relação com a produtividade do café conilon. O estudo foi realizado na fazenda experimental do INCAPER-ES. As amostras de solo foram coletadas na profundidade de 0 - 0,2 m, sendo analisados os atributos: fósforo, potássio, cálcio e magnésio, alumínio, soma de bases, capacidade de troca catiônica a pH 7 e saturação por bases. Os dados foram submetidos a uma análise descritiva, exploratória e à análise geoestatística. Utilizou-se um sistema de classificação fuzzy utilizando os atributos descritos para inferir sobre a fertilidade do solo e sua relação com a produtividade da cultura. A possibilidade de fertilidade apresentou relação espacial positiva com a produtividade da cultura, com valores mais elevados desta onde a possibilidade de solo fértil é superior.

Palavras-chave: *Coffea canephora* Pierre x Froenher. Fertilidade do solo. Cafeicultura. Geoestatística.

Abstract - The objective of this study was to analyze, using the geo-statistic and a system of classification fuzzy, the fertility of an experimental area with base in chemical attributes of the soil and its relationship with the productivity of the conilon coffee. The study was accomplished in the experimental farm of the INCAPER - ES. The soil samples were collected in the depth of 0 - 0.2 m, being analyzed the attributes: matches, potassium, calcium and magnesium, aluminum, sum of bases, cation exchange capacity (pH 7), and saturation percentage. The data were submitted to a descriptive, exploratory, and geostatistical analysis. A system of fuzzy classification was applied using the attributes described to infer about the fertility of the soil and its relationship with the productivity of the culture. The fertility possibility presented positive spatial relationship with the productivity of the culture, with higher values of this where the possibility of fertile soil is superior.

Key words: *Coffea canephora* Pierre x Froenher. Fertility of the soil. Coffee growing. Geostatistics.

* Autor para correspondência

¹Recebido para publicação em 05/04/2009; aprovado em 23/11/2009

Pesquisa desenvolvida pelo Departamento de Engenharia Rural da Universidade Federal do Espírito Santo

²Departamento de Engenharia Agrícola, UFV, Av. PH Rolfs, Campus Universitário, Viçosa-MG, Brasil, 36570-000, samuel-assis@hotmail.com

³Departamento de Eng. Rural, UFES, Alegre-ES, Brasil, 29500-000, limajss@yahoo.com.br

⁴Programa de Pós-Graduação em Eng. Agrícola, Faculdade de Engenharia Agrícola, UNICAMP, Campinas-SP, Brasil, gdsouza@hotmail.com

⁵Programa de Pós-Graduação em Energia da Agricultura, UNESP, Botucatu-SP, Brasil, ronebatista@hotmail.com

⁶Departamento de Eng. Rural, UFES, Alegre-ES, Brasil, xavier@cca.ufes.br

Introdução

Ao trabalhar com dados incertos, uma informação deixa de ser representada por um número e passa a ser representada por um conjunto. Assim, o uso da teoria clássica dos conjuntos torna-se inviável devido a sua ineficiência no tratamento de informações imprecisas. Entretanto, essas incertezas podem ser estudadas e modeladas de forma mais robusta, utilizando a teoria dos conjuntos nebulosos, também, conhecida como teoria dos conjuntos *fuzzy* (MEIRELLES et al., 2007).

A lógica fuzzy é um referencial teórico que é utilizado principalmente de duas formas: uma é representar a extensão da lógica clássica para uma mais flexível, com objetivo de formalizar conceitos imprecisos, e outra é onde se aplicam conjuntos fuzzy, a diversas teorias e tecnologias para processar informações imprecisas, por exemplo, em processos de tomada de decisão (KLIR; YUAN, 1995). A lógica fuzzy tem como apoio a teoria dos conjuntos fuzzy para sua representação. Utilizando expressões lingüísticas na sua aplicação, definem-se conjuntos os quais os valores são alocados com diferentes graus de pertinência entre falso e verdadeiro, o que rompe os limites da rígida dicotomia da lógica clássica (BONISH et al., 2004b).

Essa metodologia fornece uma alternativa para tratar com as incertezas associadas à população das plantas. Em particular, as fronteiras entre classes não são claramente definidas, e os sistemas de classificação fuzzy podem tratar dessa questão (CHIANG; HSU, 2002). Esses sistemas são aplicados em problemas de classificação em que vetores de entrada são combinados por regras e atribuídos a um dos conjuntos de classes de saída especificado.

Em casos de fertilidade do solo, em geral, apenas o limite inferior ou o superior de uma classe é um limitador de importância prática podendo inviabilizar os cultivos, sendo as classes intermediárias de limitação secundária, uma vez que nessas classes o desenvolvimento e produção das culturas, apesar de limitado, é suficiente para uma produção economicamente viável, porém com rendimentos reduzidos quando comparados às classes de altas fertilidades (MEIRELLES et al., 2007).

A lógica fuzzy vem sendo aplicada em áreas diversas das ciências exatas e humanas. Kavdir e Guyer (2003) utilizaram essa metodologia como suporte à tomada de decisão para classificar maçãs com respeito à sua qualidade. Peixoto et al. (2004) elaboraram um modelo do tipo presa-predador que descreve a interação de pulgões (presas) e joaninhas (predador)

na citricultura, em que os pulgões são considerados agentes transmissores da morte súbita de citros (doença causada por vírus). Yang et al. (2003) utilizou a lógica fuzzy para associar dados de cobertura foliar, obtidos por imagens fotografadas em campo, a três níveis de aplicação localizada de herbicida. Bressan et al. (2006) propuseram um sistema de classificação fuzzy para inferir o risco de infestação por plantas daninhas, usando krigagem e análise de imagens.

Levando em conta a natureza dos processos agrícolas e tendo em vista os modelos incertos associados à dinâmica desses processos, o objetivo deste estudo foi analisar, utilizando a geoestatística e o sistema de classificação fuzzy, a fertilidade de uma área experimental com base em atributos químicos do solo e sua relação com a produtividade do café conilon.

Material e métodos

A área experimental localiza-se na Fazenda Experimental Bananal do Norte, pertencente ao Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural (INCAPER), no distrito de Pacotuba município de Cachoeiro de Itapemirim, ES na latitude de 20°45'17,31" S e longitude de 41°17'8,86" W. A região apresenta clima tropical (Aw), segundo a classificação de Köppen, com verão quente e úmido e inverno frio e seco, temperatura média anual de 23,1 °C e precipitação anual média de 1.346 mm.

O experimento foi conduzido em uma área cultivada a cinco anos com café conilon (*Coffea canephora* Pierre x Froenher), variedade Robusta Tropical, no espaçamento de 2,9 x 0,9 m, situada no terço superior e médio de uma elevação com topo arredondado e vertente com perfil convexo com declividade média de 33,5 graus, sendo o solo classificado como Latossolo Vermelho Amarelo distrófico textura argilosa. A adubação da lavoura desde a sua implantação tem sido com parcelamento de nitrogênio (N) e potássio (K) utilizando o formulado (25-00-20) e fósforo, utilizando super simples (SS). A poda de produção é realizada anualmente, após cada colheita buscando manter, aproximadamente, 12.000 hastes por hectare na área experimental.

A amostragem de solo foi realizada na profundidade de 0,0 – 0,2 m em uma grade irregular de 10.000 m² com 109 pontos amostrais. As coordenadas de cada ponto amostral foram definidas com auxílio de um GPS topográfico (Figura 1).

A análise química do solo foi realizada conforme EMBRAPA (1997), para os atributos: fósforo (P), potássio

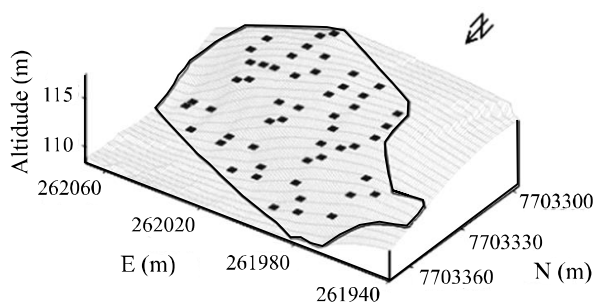


Figura 1 - Modelo digital de elevação (MDE) da área de estudo com a distribuição dos pontos amostrais

(K), cálcio e magnésio (Ca/Mg), alumínio (Al), soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica a pH 7 (CTC) e saturação por bases (V).

A colheita do café foi realizada manualmente em peneiras, nos 109 pontos amostrais, sendo a massa de café colhido corrigida para a umidade padrão de 12% e convertida para a unidade de Mg ha⁻¹.

Os dados foram submetidos a uma análise descritiva, exploratória determinando-se medidas de posição (média, mediana, valores mínimos e máximos) e medidas de dispersão (desvio-padrão, variância e coeficiente de variação). A hipótese de normalidade foi testada pelo método de Shapiro-Wilk's ao nível de 5% de probabilidade. Em seguida realizou-se a análise geoestatística buscando avaliar o atendimento da hipótese de estacionalidade assumida por meio de ajuste de um

modelo ao semivariograma, estimado pela seguinte equação:

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i) - z(x_i + h)]^2 \quad (1)$$

Em que: N(h) é o número de pares de valores [Z(x_i), Z(x_i + h)] separados por um vetor h, e x_i é uma posição espacial da variável Z. À nuvem de pontos [h, y(h)] ajusta-se uma função matemática, cujos parâmetros são conhecidos como: efeito pepita (C₀), correspondendo ao valor da interseção no eixo das semivariâncias; patamar (C₀+C₁), aproximadamente igual ao valor da variância dos dados; e alcance (a), que representa a distância na qual o semivariograma atinge o valor do patamar e a região de dependência espacial entre as amostras.

Visando-se aplicar funções de álgebra de mapas no comportamento dos atributos, os atributos P, K, Ca/Mg, Al, SB, CTC e V foram integrados para espacialização da fertilidade da área em estudo. Inicialmente, foram definidos os limites para cada atributo de acordo com cada classe de fertilidade (Tabela 1).

Realizou-se a classificação contínua, pixel-a-pixel, das representações desses atributos, utilizando o mapeamento *fuzzy*. A função de associação escolhida foi a função linear descrita por Bönisch et al. (2004a):

- Conjunto de dados com valores crescentes

$$\begin{aligned} MF_A(Z) &= 0 && \text{se } z < p \\ MF_A(Z) &= (1/\alpha)/z-p && \text{se } p < z < q \\ MF_A(Z) &= 1 && \text{se } z = q \end{aligned}$$

Tabela 1 - Critérios para classificação dos teores dos atributos do solo em classes de fertilidade⁽¹⁾ para o fósforo(P), potássio (K), cálcio e magnésio (Ca/Mg), alumínio trocável (Al), soma de bases (S), capacidade de troca catiônica (T) saturação por bases (V)

Atributos químicos	Classes de Fertilidade		
	S1	S2	S3
P (mg dm ⁻³)	>20	11-20	≤10
K (mg dm ⁻³)	>60	31-60	≤30
Ca/Mg (cmol _c dm ⁻³)	>3	1-3	<1
Al (cmol _c dm ⁻³)	≤0,3	0,3-1	>1
SB (cmol _c dm ⁻³)	>5	2,1-5	≤2
T (cmol _c dm ⁻³)	>10	4,6-10	≤4,5
V (%)	>71	51-70	≤50

⁽¹⁾ Fonte: Prezotti et al. (2007) com adaptação, S1- solo fértil, S2- solo intermediário, S3- solo não fértil

- Conjunto de dados com valores decrescentes

$$MF_A(Z) = (-1/\beta)/(z-r) \quad \text{se } q < z < r$$

$$MF_A(Z) = 0 \quad \text{se } z > r$$

Em que: $\alpha = q-p$, $\beta = r-q$ e p , q e r são valores dos limites de classe de dois conjuntos fuzzy pertencentes a um conjunto A.

A inclinação das retas define a zona de transição fuzzy para o conjunto A com valores crescentes e decrescentes.

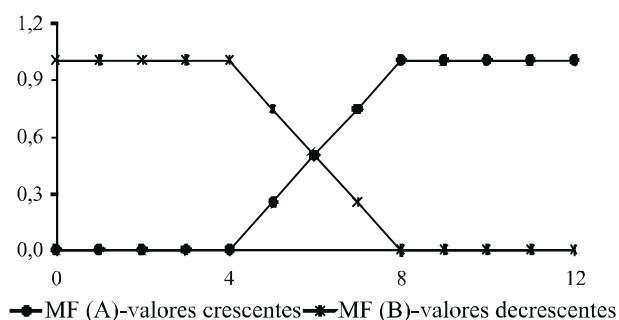


Figura 2 - Conjuntos fuzzy para dados com valores crescentes e decrescente (adaptado de Burrough & McDonnell, 1998)

Os valores dos parâmetros p , q e r foram definidos em função dos valores dos limites dos intervalos dos atributos químicos, que foram relacionados com uma fertilidade baixa (p) e com uma fertilidade boa (q e r), que corresponderam às classes de aptidão boa e regular, respectivamente (Tabela 2). Neste caso, as classes solo fértil (S1) referem-se a fertilidade boa e a classe solo não fértil (S3) refere-se a uma fertilidade baixa.

Dessa forma aos valores inferiores ao limite inferior de cada atributo atribuiu-se o valor 0, e aos valores superiores ao limite superior de cada atributo, atribuiu-se valor 1, com exceção do alumínio onde o comportamento é inverso. Aos valores intermediários aos limites superior e inferior, foram atribuídos valores entre 0 e 1, segundo a função linear fuzzy (Tabela 2) definindo os graus de pertinência.

O efeito combinado dos atributos foi medido utilizando-se funções de álgebra de mapas por meio do operador fuzzy soma ponderada. Foi atribuído peso igual para todas as representações, ou seja, considerou-se que os atributos contribuíram, de forma equitativa, na estimativa da fertilidade do solo, conforme utilizado por Bönisch et al. (2004a). Dessa forma, a operação fuzzy se tornou uma média simples das representações. Esse procedimento foi adotado baseado na

Tabela 2 - Funções lineares fuzzy utilizadas na classificação contínua das representações dos teores dos atributos: fósforo (P), potássio (K), cálcio e magnésio (Ca/Mg), alumínio trocável (Al), soma de bases (S), capacidade de troca catiônica (T), saturação por bases (V), expressos de acordo com a aptidão em fertilidade

P (mg dm ⁻³)	
$MF_K(Z) = 0$	se $z < 11$
$MF_K(Z) = (z-11)/20$	se $11 \leq z < 20$
$MF_K(Z) = 1$	se $z \geq 20$
K (mg dm ⁻³)	
$MF_K(Z) = 0$	se $z < 31$
$MF_K(Z) = (z-31)/29$	se $31 \leq z < 60$
$MF_K(Z) = 1$	se $z \geq 60$
Ca/Mg (cmol _c dm ⁻³)	
$MF_a(Z) = 0$	se $z < 1$
$MF_{CaMg}(Z) = (z-1)/2$	se $1 \leq z < 3$
$MF_{CaMg}(Z) = 1$	se $z \geq 3$
Al (cmol _c dm ⁻³)	
$MF_{Al}(Z) = 1$	se $z < 0,3$
$MF_{Al}(Z) = (4-z)/3,7$	se $0,3 \leq z < 1$
$MF_{Al}(Z) = 0$	se $z \geq 1$
SB (cmol _c dm ⁻³)	
$MF_{SB}(Z) = 0$	se $z < 2,1$
$MF_{SB}(Z) = (z-2,1)/2,9$	se $2,1 \leq z < 5$
$MF_{SB}(Z) = 1$	se $z \geq 5$
T (cmol _c dm ⁻³)	
$MF_T(Z) = 0$	se $z < 4,5$
$MF_T(Z) = (z-4,5)/5,5$	se $4,5 \leq z < 10$
$MF_T(Z) = 1$	se $z \geq 10$
V (%)	
$MF_V(Z) = 0$	se $z < 50$
$MF_V(Z) = (z-50)/20$	se $50 \leq z < 70$
$MF_V(Z) = 1$	se $z \geq 70$

Lei do Mínimo de Liebig, segundo a qual o crescimento e rendimento dos vegetais é limitado pelo elemento cuja concentração é inferior ao valor mínimo, abaixo do qual as sínteses não podem mais ser efetuadas.

Os mapas para os teores de P e K não foram gerados, pois os valores reais de concentração desses nutrientes no solo se enquadraram, em sua totalidade, nas classes de baixa (P) e alta (K) fertilidade do solo o que inviabilizou a geração de suas isolinhas, no entanto os mesmos foram considerados na ponderação.

O mapa resultante da combinação das possibilidades dos atributos químicos na área em estudo, aqui denominado de fertilidade, foi correlacionado com os valores de produtividade da cultura de café, com o intuito de validar o modelo de possibilidade.

Resultados e discussão

Os valores de tendência central, média e mediana, são bem próximos, indicando distribuição simétrica dos dados, confirmado pelos valores de assimetria (C_s) próximos de zero para a maioria dos atributos analisados (Tabela 3). Porém, segundo o teste de Shapiro-Wilk's, somente para a CTC, SB, V% e a produtividade (PROD) apresentaram distribuição normal.

No caso específico do Al, o valor de assimetria foi distante de zero, logo as caldas da curva de distribuição são levemente alongadas fazendo com que a distribuição dos dados fuja da normalidade, com um ajuste aproximado a uma distribuição teórica o que não inviabiliza posteriores estudos, pois o ideal é que as caldas não sejam muito alongadas, não comprometendo as estimativas da krigagem, as quais são baseadas nos valores médios (SOUZA et al., 2006).

De acordo com a classificação dos níveis de fertilidade para o Espírito Santo proposta por Prezotti et al. (2007), os valores médios de P e V encontram-se na classe de baixa fertilidade; os valores médios de Ca/Mg, CTC e SB na classe de média fertilidade e o nível de Al na classe de baixa acidez. O K enquadra-se na classe de alta fertilidade ($> 60 \text{ mg dm}^{-3}$) sendo seu valor médio, aproximadamente, 3 vezes superior ao limite inferior desta classe.

O Al apresentou a maior amplitude proporcional, uma vez que as variações para esse atributo são sensíveis devido aos seus baixos valores absolutos, apesar da maior parte dos valores estarem próximos da média. Esse comportamento revela menor uniformidade, caracterizada pelo maior coeficiente de variação, quando comparado às demais variáveis. Segundo a classificação proposta por Warrick e Nielsen (1980), os coeficientes de variação apresentaram-se médios (CV entre 12 e 60%) para todos os atributos com exceção do Al, onde esse foi de alta variação. Em geral, os intervalos de CVs para os atributos estão em conformidade com os resultados encontrados por Silva et al. (2008) em trabalho com café.

A produtividade média da cultura foi de $6,56 \text{ Mg ha}^{-1}$ de café seco em coco, o que equivalente a aproximadamente $110 \text{ sacas ha}^{-1}$, valor dentro dos padrões para a cafeicultura capixaba no que tange ao café conilon.

Os semivariogramas apresentaram patamares bem definidos, assumindo-se, nesse caso, estacionaridade intrínseca uma vez que não se verificou tendência de variação para as variáveis com as direções. A presença de dependência espacial observada para as variáveis, indica que práticas de manejo baseadas apenas nos valores médios são falhas, uma vez que, não considera a variabilidade espacial, podendo levar a valores distorcidos o que reduz a eficiência dos sistemas agrícolas (SILVA et al., 2007). Silveira et al. (2000) relatam que estimativas mais precisas devem ser buscadas na aplicação de fertilizantes, pois erros de estimativa poderão deslocar o valor obtido para outra faixa de recomendação, e assim, provocar adubações maiores ou menores que a necessária.

Tabela 3 - Estatística e distribuição de frequência do teor de fósforo (P), potássio (K), cálcio e magnésio (Ca/Mg), alumínio trocável (Al), soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica (T), saturação por bases (V) e a produtividade (PROD)

Variáveis	Estatísticas								
	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	CV(%)	s	C_s	C_k	p-valor
P	3,81	4,00	1,00	9,00	40,07	1,53	0,58	0,95	*
K	182,70	180,00	44,00	408,00	49,97	91,30	0,45	-0,53	*
Al	0,30	0,20	0,00	1,00	92,73	0,28	0,80	-0,18	*
Ca/Mg	1,66	1,50	0,90	2,90	27,78	0,46	0,11	0,88	*
CTC	7,84	7,65	4,70	11,80	17,79	1,40	0,17	-0,12	ns
SB	3,24	3,20	1,00	5,70	32,14	1,04	0,17	-0,31	ns
V	41,13	40,25	16,00	73,70	29,44	12,11	0,40	0,16	ns
PROD	6,56	6,44	2,70	11,96	31,46	2065,31	0,26	-0,23	ns

P: (mg dm^{-3}); K (mg dm^{-3}); Al ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), SB ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), CTC ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) e V (%); CV(%): coeficiente de variação; s: desvio padrão; C_s : coeficiente de assimetria; C_k : coeficiente de curtose; * distribuição não normal e ns distribuição normal pelo teste de Shapiro-Wilk's ($p \leq 0,05$)

O modelo que melhor se ajustou aos valores de P, Ca/Mg, Al, V foi o esférico, com alcance de dependência espacial variando de 8 a 17 m. Aos demais atributos ajustou-se o modelo exponencial com alcance variando de 19 a 50 m. Segundo Grego e Vieira (2005) o modelo esférico é o que predomina nos trabalhos em ciência do solo.

Na análise do grau de dependência espacial das variáveis em estudo, utilizou-se a relação $(C_1/C_0 + C_1)$ e os intervalos propostos por Zimback (2001), que considera a dependência espacial fraca ($IDE \leq 25\%$); moderada ($25\% < IDE \leq 75\%$) e forte ($IDE > 75\%$), onde, neste estudo, as variáveis apresentaram dependência espacial de moderada (CTC e SB) a elevada (P, K, Ca/Mg, Al, V e PROD). Esses valores são semelhantes aos encontrados por Souza et al. (2003).

Com exceção da CTC, os valores do efeito pepita (C_0) estão bem próximos de zero. Uma vez que o C_0 é o valor da semivariância para a distância zero (Vieira, 2000) e representa o componente da variabilidade espacial que não pode ser relacionado com uma causa específica (variabilidade ao acaso), quanto menor seu valor, ou seja, quanto menor a variação ao acaso mais precisa é a estimativa, por meio de krigagem, de valores em locais não medidos.

A espacialização das possibilidades (incertezas) dos atributos estão apresentadas na Figura 3, bem como a ponderação dessas possibilidades (fertilidade).

Observa-se que a área em estudo apresenta baixa disponibilidade de Al (Figura 3A) sendo que para este os valores de possibilidade de solo fértil são superiores a 0,9, ou seja, o teor de Al não está sendo um limitante

na produção da cultura do café na área em estudo, pois quanto menor o teor de Al maior a fertilidade dos solos.

Ca/Mg e SB (Figura 3B e 3D) tem padrões de pertinência semelhantes, onde, para ambos, a quase totalidade da área apresenta valores entre 0 e 0,25. Tal semelhança já era esperada, pois Ca e Mg são componentes da SB, logo se os primeiros são baixos, conseqüentemente, o segundo também será. Souza et al. (2004) trabalhando com valores absolutos observaram comportamento semelhante entre as variáveis em solos com diferentes relevos.

Apesar de possuir valores de pertinência de zero até valores superiores a 0,9, devido à reduzida amplitude de classes, conforme classificação de Prezotti et al. (2007), a CTC (Figura 3C) apresenta maior continuidade espacial com zonas de pertinência bem definidas, quando cotejada com os demais atributos, com exceção do Al.

Para a V (Figura 3E), há um predomínio de valores de pertinência entre 0 e 0,25. Valores reduzidos de V indicam que a maior proporção da soma de bases está sendo ocupada por elementos fitotóxicos (H+Al), ou seja, o solo apresenta elevada acidez, com grande disponibilidade de íons H^+ em solução, reduzindo o pH, limitando o desenvolvimento do sistema radicular e o bom rendimento das culturas.

A área apresenta média possibilidade de produção da cultura do café uma vez que os valores de pertinência da fertilidade do solo com base na ponderação dos atributos individualizados (Figura 3F) concentraram-se no intervalo de 0,5 a 0,75. Neste caso espera-se uma

Tabela 4 - Modelos e parâmetros dos semivariogramas para os atributos químicos do solo e a produtividade da cultura do café conilon

Variáveis	Modelos e Parâmetros					
	Modelo	C_0	C_0+C_1	A_0	R^2	IDE
P	Esférico	1,46	3,82	17	85	62
K	Exponencial	580,00	5589,00	19	87	90
Ca/Mg	Esférico	0,01	0,32	8	84	99
Al	Esférico	0,01	0,13	11	93	89
SB	Exponencial	0,05	1,08	10	74	95
CTC	Exponencial	1,29	3,12	50	72	68
V	Esférico	0,10	133,90	10	92	99
PROD	Gaussiano	0,56	1,18	49	97	53

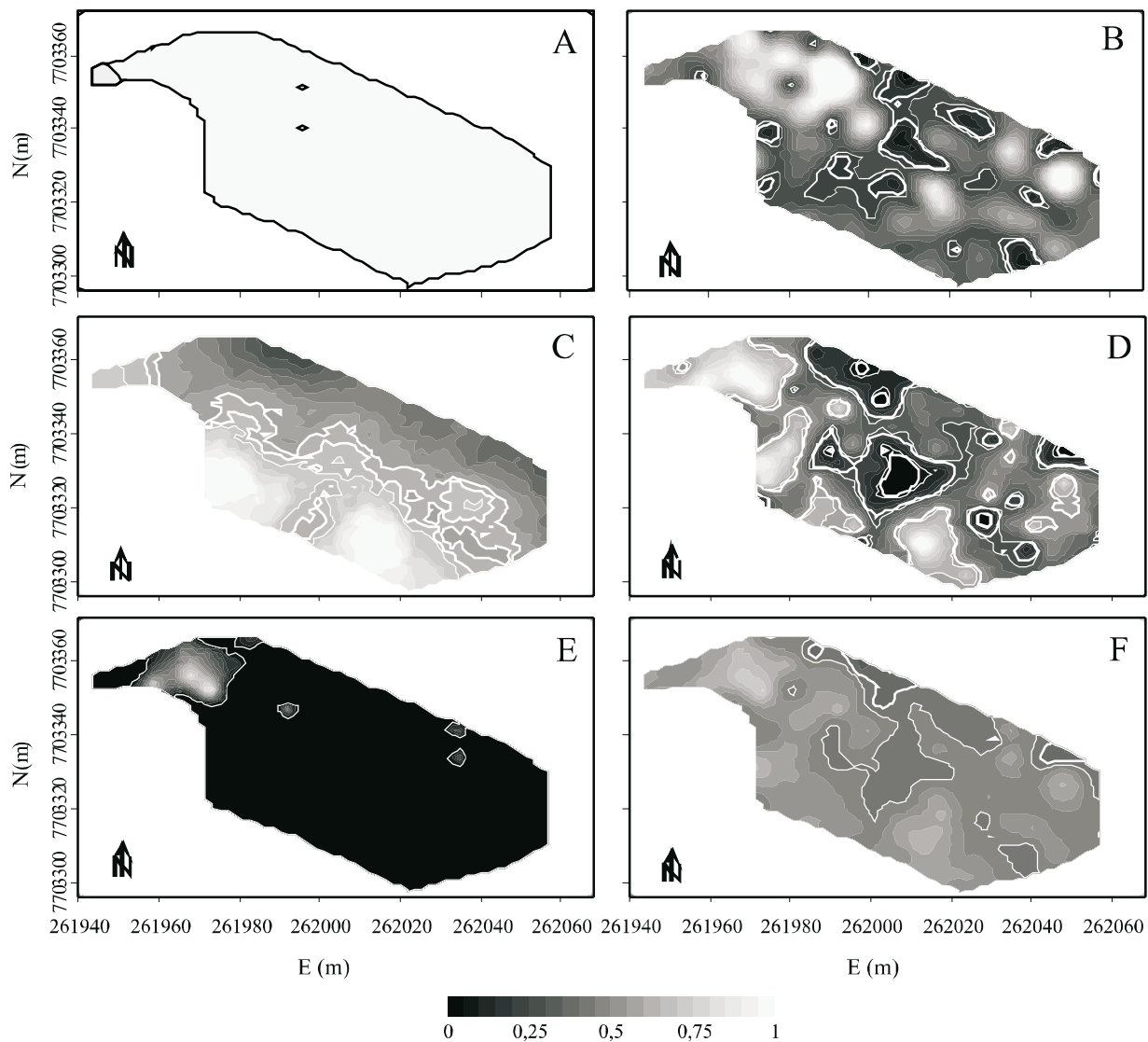


Figura 3 - Mapas de classificação fuzzy para os atributos Al (A), Ca/Mg (B), CTC (C), SB (D), V (E) e para a ponderação da fertilidade (F)

produtividade média da cultura do café uma vez que nas condições em estudo não seria possível explorar o rendimento produtivo máximo da cultura, sendo necessário corrigir os níveis de fertilidade. No entanto, não existe nenhuma região na área que inviabilize a prática da cafeicultura, o que justifica o valor médio de produção (6,56 Mg ha⁻¹) dentro de padrões aceitáveis para o conilon no Estado do Espírito Santo.

Como esperado, os valores dos graus de pertinência da fertilidade (Figura 3F), seguem comportamento espacial bem próximo da produtividade do café conilon na área em estudo (Figura 4).

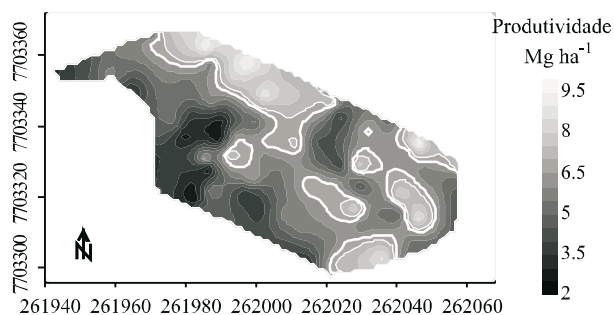


Figura 4 - Mapa de distribuição da produtividade da cultura do café conilon na área em estudo

A produtividade e a possibilidade de solo fértil apresentam correlação espacial significativa (Figura 5) com aumento simultâneo da produção em locais onde a fertilidade é superior, ou seja, as maiores produtividades na área encontram-se na porção sul e oeste onde as possibilidades de solo fértil são também superiores.

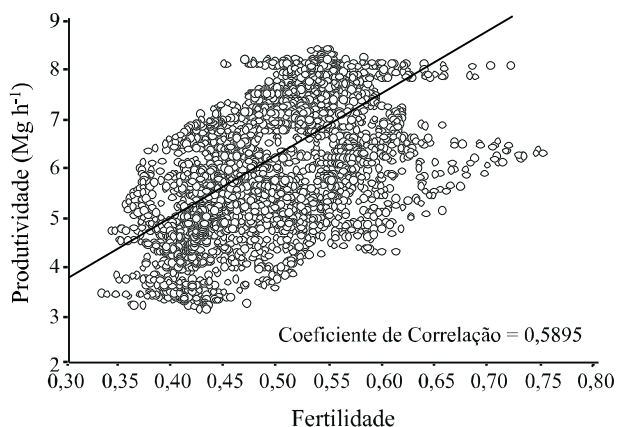


Figura 5 - Correlação entre a produtividade do café conilon e a possibilidade de solo fértil com base na lógica fuzzy

Apesar da correlação espacial significativa, alguns autores como Reiz Jr e Martinez (2002), afirmam que a relação é maior entre rendimento das culturas e o teor de nutrientes em seu tecido do que em relação à sua disponibilidade nos solos, devido, principalmente à processos de translocação e à heterogeneidade do solo onde ocorrem reações complexas envolvendo os nutrientes que muitas vezes, embora presentes e em quantidades adequadas, não estão disponíveis para a absorção pelas raízes (NOVAIS; SMYTH, 1999).

Conclusões

1. Os graus de pertinência da fertilidade apresentaram relação espacial positiva com a produtividade da cultura, com valores mais elevados desta onde a possibilidade de solo fértil é superior.
2. A lógica fuzzy permitiu visualizar as mudanças gradativas das classes de fertilidade do solo, o que melhor define zonas de transição gradual ao invés de se classificar as informações em classes definidas de forma exata.
3. A área apresentou média possibilidade de produção da cultura do café dado os níveis insatisfatórios dos nutrientes individualizados.

Referências

- BÖNISCH, S. *et al.* Representação e propagação de incertezas em dados de solos, 1- Atributos categóricos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 01, p. 33-47, 2004a.
- BÖNISCH, S. *et al.* Representação e propagação de incertezas em dados de solos, 2- Atributos numéricos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 01, p. 21-32, 2004b.
- BRESSAN, G. M. *et al.* Sistema de classificação fuzzy para o risco de infestação por plantas daninhas considerando a sua variabilidade espacial. **Planta Daninha**, v. 24, n. 02, p. 229-238, 2006.
- BURROUGH, P. A.; McDONNELL, R. A. **Principles of geographic information systems**. New York: Oxford University Press, 1998. 333 p.
- CHIANG, J.; HSU, J. Fuzzy classification trees for data analysis. **Fuzzy Sets System**, v. 130, n. 01, p. 87-99, 2002.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 1997. 212 p.
- GREGO, C. R.; VIEIRA, S. R. Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo em uma parcela experimental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 02, p. 169-177, 2005.
- KAVDIR, I.; GUYER, D. E. Apple grading using fuzzy logic. **Turkish Journal of Agriculture and Forestry**, v. 27, n. 06, p. 375-382, 2003.
- KLIR, G. J.; YUAN, B. **Fuzzy sets and fuzzy logic: theory and applications**. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1995. 324 p.
- MEIRELLES, M. S. P.; MOREIRA, F. R.; CAMARA, G. Técnicas de inferência espacial. In: MEIRELLES, M. S. P.; CAMARA, G.; ALMEIDA, C. M. (Ed.). **Geomática: Modelos e aplicações ambientais**. Brasília, DF: Embrapa, 2007. 593 p.
- NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, 1999. 399 p.
- PEIXOTO M. S.; BARROS, L. C.; BASSANEZI, R. C. Um modelo Fuzzy Presa-Predador em citros: pulgões e joaninhas. **Biomatemática**, v. 14, p. 29-38, 2004.
- PREZOTTI, L. C. *et al.* **Manual de recomendação de calagem e adubação para o estado do Espírito Santo - 5ª Aproximação**. Vitória: SEEA/INCAPER/CEDAGRO, 2007. 305 p.
- REIS JR., R. A.; MARTINEZ, H. E. P. Adição de Zn e absorção, translocação e utilização de Zn e P por cultivares de cafeeiro. **Scientia Agricola**, v. 59, n. 03, p. 537-542, 2002.
- SILVA, S. A. *et al.* Análise espacial da erosão hídrica em um latossolo vermelho amarelo sob cultivo de café conilon. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 38, n. 04, p. 335-342, 2007.
- SILVA, F. M. *et al.* Variabilidade espacial de químicos e produtividade da cultura do café em duas safras agrícolas. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 32, n. 01, p. 231-241, 2008.

- SILVEIRA, P. M. *et al.* Amostragem e variabilidade espacial de características químicas de um latossolo submetido a diferentes sistemas de preparo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 35, n. 10, p. 2057-2064, 2000.
- SOUZA, C. K. *et al.* Influência do relevo na variação anisotrópica dos atributos químicos e granulométricos de uma latossolo em Jaboticabal-SP. **Engenharia Agrícola**, v. 23, n. 03, p. 486-495, 2003.
- SOUZA, Z. M. *et al.* Variabilidade espacial do pH, Ca, Mg e V% do solo em diferentes formas do relevo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Ciência Rural**, v. 34, n. 06, p. 1763-1771, 2004.
- SOUZA, Z. M. *et al.* Otimização amostral de atributos de latossolos considerando aspectos solo-relevo. **Ciência Rural**, v. 36, n. 03, p. 829-836, 2006.
- VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. p. 1-53. 1 v.
- YANG, C. C. *et al.* Development of a herbicide application map using artificial neural networks and fuzzy logic. **Agricultural System**, v. 76, n. 02, p. 561-574, 2003.
- WARRICK, A.W.; NIELSEN, D.R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (Ed.). **Applications of soil physics**. New York: Academic Press, 1980. p.319-44.
- ZIMBACK, C. R. L. **Análise espacial de atributos químicos de solos para fins de mapeamento da fertilidade do solo**. 2001. 114 f. Tese (Doutorado em Livre-Docência) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu.