

LÓGICA FUZZY NO MAPEAMENTO DE VARIÁVEIS INDICADORAS DE FERTILIDADE DO SOLO

FUZZY LOGIC TO MAP OF VARIABLES INDICATIVE OF SOIL FERTILITY

Samuel de Assis Silva¹; Julião Soares de Souza Lima²

RESUMO

O objetivo desse experimento foi utilizar a lógica fuzzy no mapeamento da soma de bases (SB), capacidade de troca de cátions (CTC) e da saturação por bases (V%) em uma área cultivada com café arábica variedade catucaí, considerando a variabilidade espacial. As coletas de solo foram realizadas em uma malha com 50 pontos amostrais na projeção da copa das plantas. Os dados foram submetidos a uma análise descritiva e exploratória. Utilizou-se um sistema de classificação fuzzy na integração dos valores dos atributos. Em seguida procedeu-se a análise geoestatística, para quantificar o grau de dependência espacial das possibilidades dos atributos. Com base nos atributos avaliados, a área apresenta baixa possibilidade de desenvolvimento e rendimento da cultura, uma vez que esses atributos apresentaram baixa possibilidade de disponibilidade.

Palavras-chave: Geoestatística, conjuntos nebulosos, fertilidade do solo.

ABSTRACT

The objective of this experiment was to use fuzzy logic to map the sum of bases (SB), cation exchange capacity (CTC) and base saturation (V%) in an area with arabica coffee variety Catucaí, considering the spatial variability. The samples of soil were held in a loop with 50 sampling points in the projection of the crown of the plants. The data were subjected to a descriptive analysis and exploratory. We used a classification system in the integration of fuzzy values of attributes. Then proceeded a geostatistic analysis to quantify the degree of dependence of the possibilities of spatial attributes. Based on the attributes evaluated, the area has low possibility of development and yield of crops, since these attributes showed a low possibility of availability.

Key words: Geostatistics, fuzzy sets, soil fertility.

INTRODUÇÃO

Através dos avanços tecnológicos na agropecuária, tem-se notado, cada vez mais, que os diversos setores da agricultura não podem ser tratados de maneira homogênea no que diz respeito à medição de variáveis nas áreas agrícolas. Neste sentido, as avaliações devem ser diferenciadas elevando a eficiência na aplicação e aproveitamento de insumos, podendo assim melhorar a produtividade, reduzir o custo de produção e o impacto ambiental causado pelo excesso utilizado (Farias *et al.*, 2003).

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).

Uma forma de representar essa heterogeneidade, é a utilização de um referencial teórico como a lógica

¹ Centro de Ciências Agrárias, - Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Deptº de Engenharia Rural, Caixa Postal 16, CEP 29500-000, Alegre – ES. email: samuel-assis@hotmail.com

² Deptº de Engenharia Rural, Centro de Ciências Agrárias, - Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). email: limajss@yahoo.com.br

fuzzy é que neste sentido 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 a 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 por objetivo modelar, de modo aproximado, o raciocínio humano, visando manipular informações em um ambiente de incerteza e imprecisão, fornecendo uma resposta aproximada para uma questão baseada em um conhecimento inexato, incompleto ou não totalmente confiável. Um elemento pode pertencer, com certo grau, denominado grau de pertinência a um determinado conjunto fuzzy. O elemento de um conjunto fuzzy é representado por $MF_A(z_i)/z_i$, que denota que o elemento z_i pertence ao conjunto fuzzy com grau $MF_A(z_i)$ (Bönisch *et al.* 2004).

A modelagem fuzzy tem sido extensamente utilizada, por basear-se na caracterização de classes que não possuem, ou não podem definir, limites rígidos entre si (Burrough & McDonnell, 1998), sendo indicada para lidar com ambigüidades, abstrações e ambivalências em modelos matemáticos complexos que representam limites difusos comuns em processos naturais (Bönisch *et al.* 2004).

O objetivo desse experimento foi utilizar a lógica fuzzy para mapear fertilidade de um Latossolo Vermelho Amarelo húmico cultivado com café arábica variedade catucaí, baseada na soma de bases (SB), capacidade de troca de cátions (CTC) e da saturação por bases (V%), considerando a variabilidade espacial.

MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho foi conduzido em uma área na fazenda Jaguarai no município de Reduto, na região leste do Estado de Minas Gerais, a 20° 45' 45,4' de latitude S e 41° 32' 9,75' de longitude W. A área, com diferença de nível acentuada e 30° de declividade, vem sendo cultivada a cinco anos com *Coffea arabica* L. variedade catucaí, no espaçamento de 2,0 x 0,60m, sendo o solo, classificado como Latossolo Vermelho Amarelo húmico com horizonte A bastante espesso e rico em matéria orgânica, conforme classificação apresentada pela Embrapa (1999).

As amostragens de solo foram realizadas em uma malha totalizando 50 pontos georreferenciados (Figura 1), com as amostras coletadas na projeção das copas de três plantas (constituindo o ponto de amostragem), na profundidade de 0-0,2 m.

Os atributos avaliados foram a soma de bases (SB), capacidade de troca de cátions (CTC) e a saturação por bases (V%).

Os valores encontrados foram analisados por meio das medidas de posição e dispersão da estatística descritiva e exploratória, bem como o teste Shapiro-Wilk's ($p < 0,05$) para testar a normalidade utilizando o software Statistica.

Em seguida os dados foram submetidos à análise geoestatística, a fim de verificar a existência e, neste caso, quantificar o grau de dependência espacial, a partir do ajuste de funções teóricas aos modelos de semivariogramas experimentais, com base na pressuposição de estacionaridade da hipótese intrínseca e conforme equação:

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

em que $N(h)$ é o número de pares experimentais de observações $Z(x_i)$, $Z(x_i+h)$, separados por um vetor h . No ajuste dos modelos teóricos aos semivariogramas experimentais determinou-se os coeficientes efeito pepita (C_0), patamar ($C_0 + C$), variância estrutural (C) e alcance (A_0) pelo software GS+. Na escolha dos modelos utilizou-se o critério dos mínimos quadrados, optando-se na seleção pelos modelos colm maior valor de R^2 (coeficiente

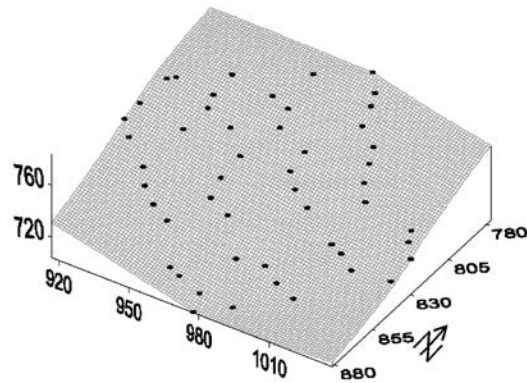


Figura 1. Modelo digital de elevação da área em estudo com destaque para os pontos de amostrais.

de determinação), menor SQR (soma de quadrado dos resíduos) e maior valor do coeficiente de correlação obtido pelo método de validação cruzada (GUIMARÃES, 2000).

Para análise do índice de dependência espacial (IDE), foi utilizado a relação $C1/(C0+C1)$ e os intervalos propostos por Zimback (2001) que considera a dependência espacial fraca ($IDE < 25\%$); moderada ($25\% \leq IDE < 75\%$) e forte ($IDE \geq 75\%$).

Visando testar o efeito de funções de álgebra de mapas na propagação de incertezas associadas às representações numéricas, os atributos numéricos foram integrados para espacialização. Nesta etapa, foi necessário, inicialmente, expressar cada atributo de acordo com as classes de fertilidade (Tabela 1).

As representações desses atributos foram submetidas a uma classificação contínua utilizando o

mapeamento fuzzy. A função de associação escolhida, para os valores de SB, CTC e V%, foi a função linear descrita por Bönisch *et al.* (2004).

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

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

A inclinação da reta (Figura 2) define a zona de transição fuzzy para o conjunto A com valores crescentes para os atributos SB, CTC e V%.

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 fertilidade do solo, dessa forma, a operação fuzzy se tornou uma média simples das representações.

A estimativa de valores de pertinência de SB, CTC e V% em locais não amostrados foi realizada através da krigagem ordinária, sendo a análise geoestatística, bem como as interpolações, realizada no software GS+, e os mapas confeccionados no software Surfer.

Tabela 1

Critérios para determinação das classes de acidez⁽¹⁾ do solo

Atributo	Classes de Fertilidade		
	Baixo	Médio	Alto
SB	< 1,80	1,81-3,60	> 3,61
CTC	< 4,30	4,31-8,60	> 8,61
V (%)	< 40,0	40,10-60,00	> 60,10

⁽¹⁾ Classes definidas segundo Ribeiro *et al.* (1999); SB e CTC em $\text{cmol}^c \text{dm}^{-3}$.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Através da análise descritiva, após retirada dos valores discrepantes, (Tabela 2) que, apesar de

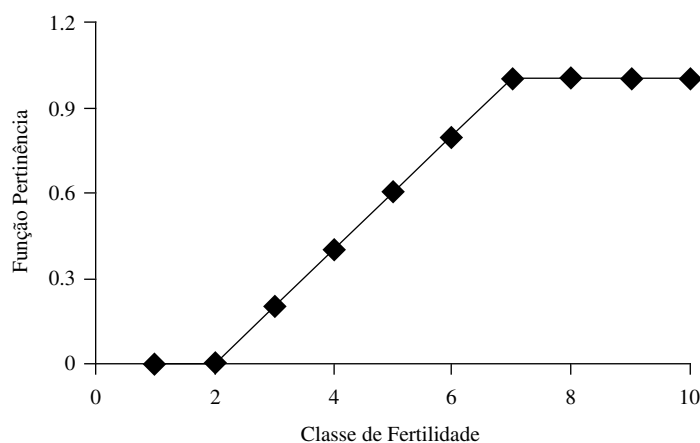


Figura 2. Conjunto fuzzy para os atributos com valores crescentes (adaptado de Burrough & McDonnell, 1998)

considerar os dados espacialmente independentes, tem a função de analisar seu comportamento geral e identificar influências que prejudicam a análise geoestatística, observa-se que os atributos apresentaram distribuição de frequência com média e mediana semelhantes, portanto, considerados como simétrica, com exceção da SB onde o coeficiente de assimetria foi distante de zero o que contribui para uma distribuição não normal analisada pelo teste de Shapiro-Wilk's a 5% de probabilidade. Os demais atributos seguem a distribuição normal.

Em relação à variabilidade dos dados, medida pelo CV (%), os maiores valores de coeficientes foram encontrados para SB e V% e, em geral, foram classificados como médios para todas as variáveis, com base nos limites do CV propostos por Warrick & Nielsen (1980), para classificação de variáveis do solo ($CV < 12\%$), ($12\% < CV < 60\%$) e ($CV > 60\%$)

para baixa, média e alta variabilidade, respectivamente. Segundo Landim (2003), o coeficiente de variação fornece uma medida relativa da precisão do experimento, sendo bastante útil na avaliação da dispersão dos dados.

Após aplicação da função de classificação fuzzy, os dados foram submetidos à análise geoestatística (Tabela 3), onde se observa que as funções pertinência para todos os atributos apresentaram de pendência espacial com ajuste do modelo esférico para todos. O modelo esférico é o mais encontrado nas pesquisas que envolvem atributos de solo e de planta (Souza *et al.*, 2004; Grego & Vieira, 2005).

Os alcances dos semivariogramas variaram de 9 m para o SB até 16 m para o CTC e V%, expressando, de um modo geral, reduzida continuidade espacial para as variáveis em estudo. Os valores de alcance tem aplicação direta no plano

Tabela 2

Estadística descritiva da SB, CTC e V% em área sob cultivo de café arábica.

Atributos	Estatísticas								
	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	CV(%)	s	C _s	C _k	w
SB	1.42	1.31	0.67	2.72	35.61	0.5	0.73	-0.07	*
CTC	6.6	6.49	5.17	7.83	10.2	0.67	0.15	-0.36	ns
V%	20.69	20.4	9.9	31.6	26.93	5.57	0.11	-0.85	ns

SB e CTC ($\text{cmol}^c \text{dm}^{-3}$); s - desvio-padrão; CV - coeficiente de variação; C_s - Coeficiente de assimetria; C_k - coeficiente de curtose; ns distribuição normal pelo teste Shapiro-Wilk's (w) a 5% de probabilidade; * distribuição não normal pelo teste Shapiro-Wilk's (w) a 5% de probabilidade.

Tabela 3

Modelos e parâmetros dos semivariogramas médios escalonados das variáveis SB, CTC e V%.

Parâmetros	Atributos		
	SB	CTC	V%
Modelo	Esférico	Esférico	Esférico
C ₀	0.353	0.074	0.289
C ₀ +C	1.030	0.778	1.000
IDE	66	90	72
A ₀	9	16	16
R ²	47	74	40

IDE – índice de dependência espacial

de amostragem em agricultura de precisão, pois indicam a distância máxima que uma variável está correlacionada espacialmente (Vieira, 2000), ou seja, determinações realizadas a distâncias maiores que o alcance têm distribuição aleatória e, por isso, são independentes entre si.

Os atributos SB e V% apresentaram moderada dependência espacial, enquanto que a CTC apresentou dependência forte de acordo com os limites propostos por Zimback (2001), em que a dependência espacial para valores $\leq 25\%$ é considerada fraca; entre 25% e 75%, moderada e $\geq 75\%$ dependência forte.

Com exceção da CTC, os valores do efeito pepita (C0) estão distantes de zero, o que reduz a precisão de estimativas, por meio da krigagem, de valores em locais não medidos, uma vez que o C0 representa o componente da variabilidade espacial que não pode ser relacionado com uma causa específica (variabilidade ao acaso) e quanto menor seu valor, ou seja, quanto menor a variação ao acaso mais precisa é a estimativa (Vieira, 2000).

Através dos mapas de possibilidade para os atributos avaliados (Figuras 3), é possível constatar baixa fertilidade da área em estudo, representada por graus de pertinência próximos de zero para os três atributos avaliados.

A possibilidade de disponibilidade de SB cresce no sentido leste-oeste na área em estudo, no entanto seus valores são próximos de zero, o que indica baixa disponibilidade de, onde, a quase totalidade da área apresenta valores entre 0 e 0,25. Se os valores de SB são baixos, isso indica que há uma reduzida concentração de K, Ca e Mg na área, pois estes nutrientes são componentes da SB, logo as bases, importantes ao desenvolvimento das culturas, podem limitar a produtividade do cafeeiro devido à baixa disponibilidade. Souza *et al.* (2004) trabalhando com valores absolutos observaram comportamento semelhante entre as variáveis em solos com diferentes relevos.

Valores de possibilidade de CTC se concentram entre 0,25 e 0,75 na área, caracterizando possibi-

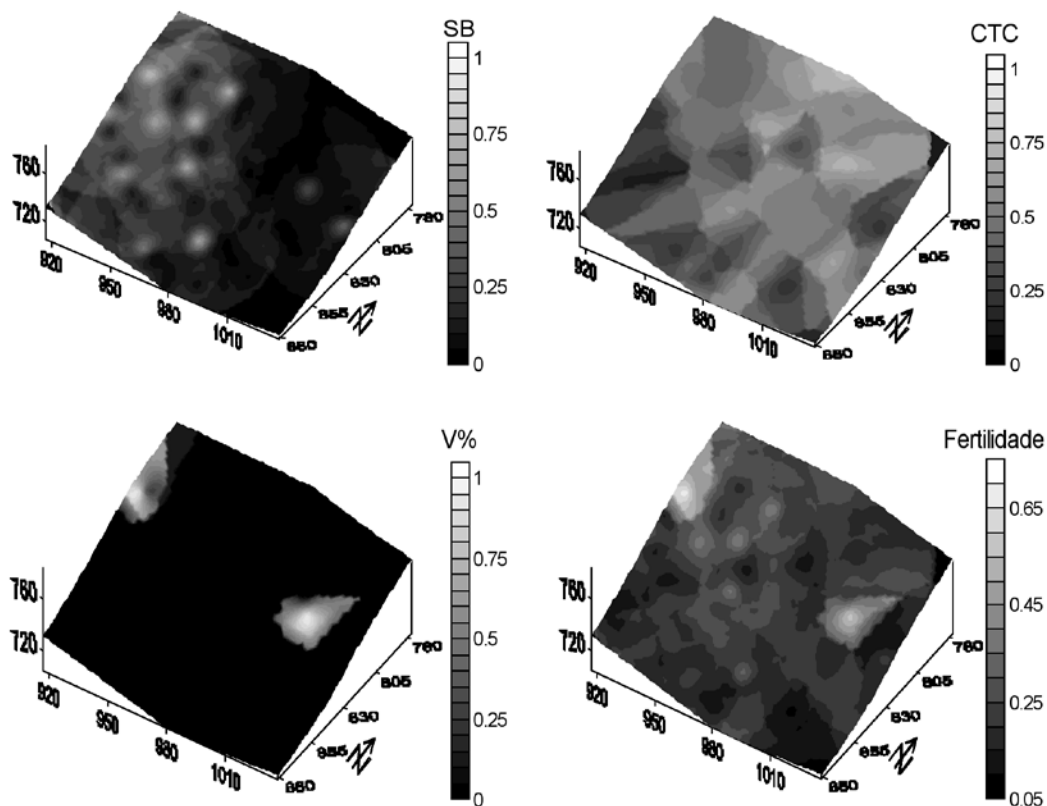


Figura 3. Mapas de classificação fuzzy para os atributos SB, CTC e V% e para a ponderação da fertilidade do solo.

lidades medianas de fertilidade quando analisada apenas por esse atributo. No entanto se analisarmos a saturação do solo por bases (V%), a fertilidade é baixa, uma vez que a quase totalidade da área apresenta valores de pertinência iguais a zero. Isso indica que a maior parte da CTC está sendo ocupada por H+Al, o que é um impedimento ao bom desenvolvimento e rendimento das culturas, ou seja, o solo apresenta elevada acidez, com grande disponibilidade de íons H+ em solução, reduzindo o pH, limitando o desenvolvimento do sistema radicular.

A área apresenta baixa 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 concentraram-se no intervalo abaixo de 0,5. Neste caso espera-se uma produtividade reduzida do cafeeiro 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, apesar da baixa fertilidade da área.

Esses resultados sugerem que as práticas de manejo devem considerar essa distribuição para que a correção das deficiências não seja falha, uma vez que, por exemplo, apesar de a quase totalidade da área apresentar valores de possibilidade para a V%, existem duas micro-regiões com possibilidades elevadas, onde a necessidade de reposição seria menor.

CONCLUSÕES

As possibilidades dos atributos avaliados apresentaram dependência espacial na profundidade estudada, com baixa continuidade espacial e IDE variando de mediano a forte.

Com base nos atributos avaliados, a área apresenta baixa possibilidade de desenvolvimento e rendimento da cultura, uma vez que esses atributos apresentaram baixa possibilidade de disponibilidade.

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.

REFERÊNCIAS

- BÖNISCH, S.; LOPES ASSAD, M.L.; CÂMARA, G. MONTEIRO, A.M.V. 2004.** Representação e propagação de incertezas em dados de solos, 1- Atributos categóricos, *Revista Brasileira de Ciências do Solo*, Viçosa-MG, v. 28, p. 21-32.
- BURROUGH, P.A.; McDONNELL, R.A. 1998.** *Principles of geographic information systems*. New York, Oxford University Press 333 p.
- EMBRAPA 1999.** Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Centro Nacional de Pesquisa de Solos, *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*, Rio de Janeiro 412 p.
- FARIAS, P.R.S.; NOCITI, L.A.S.; BARBOSA, J.C.; PERECIN, D. 2003.** Agricultura de precisão: Mapeamento da produtividade em pomares cítricos usando geoestatística. *Rev. Bras Frutic.*, Jaboticabal, SP, v. 25, n. 2.
- GUIMARÃES, E.C. 2000.** Variabilidade espacial de atributos de uma latossolo vermelho escuro textura argilosa da região do cerrado, submetido ao plantio direto e ao plantio convencional. 2000. 85 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas
- GREGO, C.R.; VIEIRA, S.R. 2005.** Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo em uma parcela experimental. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 29, n. 2, p. 169-177.
- KLIR, G.J.; YUAN, B. 2003.** *Fuzzy sets and fuzzy logic: theory and applications*. Upper Saddle River (NJ): Prentice Hall; 1995.
- LANDIM, P.M.B. 2003.** *Análise estatística de dados geológicos 2*. ed. São Paulo. UNESP 253 p.
- MEIRELLES, M.S.P.; MOREIRA, F.R.; CAMARA, G. Técnicas de inferência espacial, 2007.** In: Meirelles, M.S.P.; CAMARA, G.; ALMEIDA, C.M. (Eds.), *Geomática: Modelos e aplicação Tecnológica*, 2007, 593 p.
- RIBEIRO, A.C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ, V.H.V. (Ed). 1999.** Recomendações para uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais. 5a Aproximação. Comissão. Comissão de Fertilidade do solo do Estado de Minas Gerais-CGSEMG. Viçosa, MG. 359 p.
- SOUZA, Z.M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G.T.; MOREIRA, L.F. 2004.** Variabilidade espacial do pH, Ca, Mg e V% do solo em diferentes formas do relevo sob cultivo de cana-de-açúcar. *Ciência Rural*, Santa Maria-RS, v.34, n. 6, nov-dez.
- VIEIRA, S.R. 2000.** Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. (Eds.). *Tópicos em ciência do solo*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 1, p. 1-53.
- WARRICK, A.W. & NIELSEN, D.R. 1980.** Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (Ed.). *Application of soil physics*. New York. Academic Press 385 p.
- ZIMBACK, C.R.L. 2001.** *Análise espacial de atributos químicos de solos para fins de mapeamento da fertilidade do solo*. 2001. 114 f. Tese (Livre-Docência) - Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu.