



**Encontro Nacional  
de Educação, Ciência  
e Tecnologia/UEPB**

## **VARIABILIDADE ESPACIAL DA FERTILIDADE DO SOLO APÓS O DESMATAMENTO DA CAATINGA E O REFLORESTAMENTO COM ALGAROBA (PROSOPIS JULIFLORA)**

Marystella Duarte CORREIA<sup>1</sup>, Rômulo Simões César MENEZES<sup>2</sup>, Ricardo Alves de OLINDA<sup>3</sup>

<sup>1</sup> DEINFO, Universidade Federal Rural de Pernambuco-UFRPE, Av. D. Manoel de Medeiros, S/Nº - CEP 52.171-900 – Dois Irmãos-Recife-PE E-mail: marys\_duarte@hotmail.com. Telefone/Fax: (81) 3320-6490.

<sup>2</sup> DEN, Universidade Federal de Pernambuco-UFPE, Av. Prof. Moraes Rego, 1235 - Cidade Universitária, Recife - PE - CEP: 50670-901 . E-mail: rmenezes@ufpe.br Telefone: (81) 2126.8000

<sup>3</sup> Departamento de Estatística, Universidade Estadual da Paraíba-UEPB, Rua Baraúnas, 351- Bairro Universitário – Campina Grande-PB, CEP: 58.429-000. E-mail: ricardo.estat@yahoo.com.br. Telefone: (83) 3315-3300.

### **RESUMO**

*Prosopis juliflora*, é uma árvore que cresce razoavelmente bem nos desertos americanos e em alguns africanos, sendo uma espécie xerófila. Adaptou-se muito bem no Nordeste brasileiro. É uma planta seletiva, pouco exigente em água, cuja ocorrência, em sua forma natural, se dá em zonas tropicais áridas, que não chegam a alcançar índices de 100 mm. Essa característica é de extrema importância para o nordeste brasileiro, uma vez que a precipitação pluviométrica média anual dessa região gira em torno de 750 mm e, embora seja baixa para outras espécies vegetais, já é 7,5 vezes maior do que essa espécie necessita para ocorrer. O Bioma Caatinga, único bioma exclusivamente brasileiro, se concentra na região nordeste do Brasil, ocupando cerca de 12% do território nacional. O semivariograma é a parte central dos estudos geoestatísticos, capaz de descrever a variação espacial, além de ser o ponto chave na interpolação dos dados por Krigagem. Daí a importância do ajuste e seleção dos modelos. O presente estudo foi conduzido em uma fazenda agroflorestal e silvipastoril, inserida na cidade de Custódia PE. O experimento foi realizado em um Luvissole com uma distância entre as árvores plantadas de 10m x 10m. A amostra foi aleatória, foram coletadas 81 amostras em um sistema regular de solo junto com suas coordenadas cartesianas, a Algaroba está inserida sempre ao centro da área. O objetivo é analisar a variabilidade espacial do teor de carbono como indicador do grau de fertilidade dos solos da Caatinga. As características analisadas possuem estruturas espaciais. Dentre as funções estudadas, a função de correlação que melhor ajustou-se ao semivariograma foi o modelo *Matérn* com *Kappa 0.5*, o mesmo apresentou o menor valor de *AIC*. Percebe-se uma



## Encontro Nacional de Educação, Ciência e Tecnologia/UEPB

dependência espacial de carbono forte nesta área, visível através da krigagem, conclui-se então que o solo permanece fértil.

PALAVRAS CHAVE: Desmatamento, Semivariograma, *Prosopis juliflora*, Dependência espacial.

### 1 INTRODUÇÃO

Os atributos físicos e químicos do solo influenciam diretamente e indiretamente o crescimento e o desenvolvimento. A avaliação da variabilidade espacial destes atributos tem-se tornado importante ferramenta na determinação de estratégias de manejo do solo (Mello, 2004).

A análise da variabilidade de atributos físicos do solo pode ser realizada por meio da estatística descritiva, antigamente, utilizavam grandes quantidades de dados amostrais (Landim, 2003). Esta ferramenta, entretanto, não considera a distribuição dos dados no espaço, ao contrário da geoestatística, que considera a dependência espacial entre as amostras e a sua localização geográfica.

O semivariograma é a parte central dos estudos geoestatísticos, capaz de descrever a variação espacial, além de ser o ponto chave na interpolação dos dados por Krigagem (Guimarães, 2004). Daí a importância do ajuste e seleção dos modelos. O presente estudo foi conduzido em uma fazenda agroflorestal silvipastoril, inserida na cidade de Custódia PE. As árvores foram incluídas nos campos cultivados, a fim de verificar a fertilidade do solo e a variabilidade do nutriente.

### 2 METODOLOGIA

O banco de dados utilizado foi coletado em 1997, por pesquisadores e estudantes do Grupo de Pesquisa em Energia da Biomassa, do Departamento de Energia Nuclear da UFPE. O experimento foi realizado em um Luvissole, com uma área de 3000 ha, com uma distância cerca de 10m entre uma árvore e outra. Foram coletadas 81 amostras de solo com 15 cm de profundidade, junto com suas coordenadas cartesianas, em uma amostragem aleatória e regular, onde a *Prosopis juliflora* está inclusa. A área estudada está inserida na Fazenda Jaçanã em um



## Encontro Nacional de Educação, Ciência e Tecnologia/UEPB

sistema agroflorestal silvipastoril, localizada no Município de Custódia, PE. Os dados do presente estudo foram obtidos na área de reserva legal, a qual tem sido preservada por pelo menos cerca de 28 anos.

Para as análises da variável, utilizou-se o software estatístico R version 2.15.0.

### Índice de Dependência Espacial

Para analisar o grau da dependência espacial do atributo em estudo, utilizou-se o Índice de Dependência Espacial (IDE%), definido pela seguinte equação:

$$IDE(\%) = \frac{\tau^2}{\tau^2 + \sigma^2} \times 100$$

Em que:

$\tau^2$  = Efeito pepita ou nugget;

$\sigma^2$  = Componente estrutural;

$\tau^2 + \sigma^2$  = Patamar.

E a classificação quanto ao grau de dependência espacial da variável em estudo, segundo os intervalos propostos por Cambardella et al. (1994) para avaliar a % do efeito pepita:

- i)  $IDE < 25\%$  forte dependência espacial;
- ii)  $25\% < IDE < 75\%$  dependência moderada;
- iii)  $IDE > 75\%$  dependência fraca;

### Variograma / Semivariograma

O variograma é utilizado para verificar a presença de correlação espacial entre as unidades amostrais. Analisa o grau de dependência espacial entre amostras dentro de um campo experimental, também é usado para estimar valores para locais não amostrados, através da técnica de krigagem. Quando divide-se o variograma por dois, para compatibilização da fórmula, obtém-se então o semivariograma (Olinda, 2010).



## Encontro Nacional de Educação, Ciência e Tecnologia/UEPB

$$\hat{\gamma}(\underline{h}) = \frac{1}{2N(\underline{h})} \sum_{i=1}^{N(\underline{h})} [Z(s_i) - Z(s_i + \underline{h})]^2$$

### Funções de correlações

A partir do semivariograma é possível ajustar uma função matemática que expressa a estrutura de dependência espacial da característica avaliada, é necessário ajustá-lo a um modelo teórico (Mello, 2004). Dentre os vários modelos existentes na literatura, as funções de correlações mais usuais escolhidos para ajustar os dados para este estudo são o Matérn com kappa (0,5 e 1,0), o Esférico, o Gaussiano e o Circular.

- **Matérn** Essa família de funções de correlação foi proposta por Bertil Matérn (1986), em que  $\Gamma$  é a função Gama,  $K$  é a função Bessel de ordem  $k$ ,  $h$  é a distância euclidiana entre duas localizações e  $\phi$  é o parâmetro que está relacionado ao alcance, maiores valores indicam dependência espacial de maior alcance. O parâmetro  $k$  está relacionado à suavidade, a função Matérn com *kappa* 0,5 refere-se ao modelo exponencial, conforme apresentado na Equação 2 (Mello, 2005).

$$(1) \rho(\underline{h}) = \left\{ 2^{k-1} \Gamma(k) \right\}^{-1} \left( \frac{h}{\phi} \right)^k K_k \left( \frac{h}{\phi} \right) \quad (2) \rho(\underline{h}) = \exp \left( -\frac{h}{\phi} \right)$$

- **Esférico** É o mais comum, podendo-se afirmar que equivale à função de distribuição normal da estatística clássica (Landim, 2003).

$$\rho(\underline{h}) = 1 - 1,5 \left( \frac{h}{\phi} \right) + 0,5 \left( \frac{h}{\phi} \right)^3$$

- **Gaussiano** Seu comportamento parabólico próximo à origem e a tangente nesse ponto é horizontal, o que indica pequena variabilidade para curtas distâncias (Landim, 2003).



## Encontro Nacional de Educação, Ciência e Tecnologia/UEPB

$$\rho(\tilde{h}) = \exp\left(-\frac{\tilde{h}}{\phi}\right)^2$$

- **Circular** Segundo Mcbratney e Webster (1986), a função de correlação circular é válida em  $R$  e em  $R^2$ , mas não em  $R^3$  e define-se da seguinte forma (Santos, 2011):

$$\rho(\mathbf{h}) = \begin{cases} \frac{2}{\pi} \left( \text{sen}^{-1}(\mathbf{h} + \sqrt{1 - \mathbf{h}^2}) \right), & \mathbf{h} > 1 \\ 1 & \end{cases}$$

### **Critério de Informação de Akaike (AIC)**

O Critério de Informação de Akaike (AIC) tem sido bastante utilizado para diferentes estruturas de covariâncias, relaciona-se a discrepância que existe entre o modelo verdadeiro e o aproximado, por meio da máxima verossimilhança. Seleciona-se uma combinação de variáveis exploratórias a modelos para a função de correlação que minimize o valor de AIC (Olinda, 2010).

$$AIC = -2 \times (\log L(\boldsymbol{\theta}; y)) + 2p$$

### **Krigagem**

Uma aplicação imediata do semivariograma é a utilização das informações geradas por ele na interpolação, ou seja, na estimativa de dados e posterior mapeamento da variável. É um processo de estimativa de valores de variáveis distribuídas no espaço, e/ou no tempo, a partir de valores adjacentes enquanto considerados como interdependentes pelo semivariograma (Landim, 2003).

$$\hat{z}(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i)$$

A **krigagem simples** é utilizada quando a média é assumida como estatisticamente constante para toda a área em estudo. A **krigagem ordinária** é mais utilizada do que a krigagem simples por não exigir conhecimento nem estacionaridade da média sobre toda a área estudada.



## Encontro Nacional de Educação, Ciência e Tecnologia/UEPB

### Valores de Referência

Para ser considerado o solo no bioma caatinga como fértil, há valores de referências para fazerem-se comparações com os valores observados: O valor de teor de carbono  $<0,8$  em solos classifica os solos como de baixa fertilidade; em solos com valores entre  $0,8$  à  $1,4$  (fertilidade média); e em solos com valores  $>1,4$  (fertilidade alta). (Banco do Nordeste, 2007). Neste trabalho analisou-se a média do valor considerado médio  $1,1$ .

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

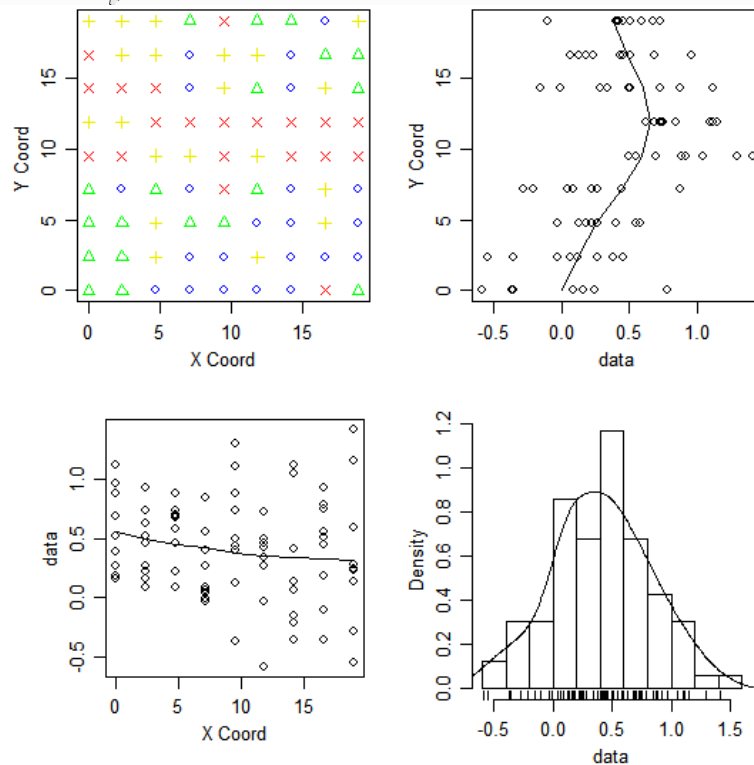
A análise estatística descritiva mostra que os dados possuem uma distribuição de probabilidade normal aproximada. Conforme os resultados abaixo:

**Tabela 1-** Estatísticas descritivas: média, mínimo, máximo, desvio padrão (D.P.), coeficiente de variação (C.V.), curtose e assimetria dos teores de carbono no solo na área com Algaroba.

Média	Mínimo	Máximo	D.P.	C.V.	Curtose	Assimetria
1,520	0,516	3,084	0,540	35,55%	3,060	0,553

Observa-se que a distribuição do atributo carbono é assimétrica positiva, segundo critérios propostos por Warrick e Nielsen (1980) para os atributos do solo, o coeficiente de variação (CV) é considerado como médio ( $12\% < CV < 52\%$ ).

Na Figura 1 o gráfico do canto superior esquerdo representa os dados nos quartis já transformados, os símbolos "+", " $\Delta$ ", "o", "x", nesta ordem, indicam os quartis amostral, essa imagem condiz com a idéia de que existe padrão espacial. Os gráficos do canto superior direito e do canto inferior esquerdo apresentam a dispersão dos dados em torno da média, o histograma segue uma distribuição normal.



**Figura 1-** Gráficos descritivos do padrão espacial de amostras de solo, com os dados transformados.

Na Tabela 2 apresentam-se as estimativas de máxima verossimilhança para os parâmetros dos modelos ajustados aos dados de carbono no solo.

**Tabela 2** - Estimativa dos parâmetros associado aos modelos para a variável Carbono por meio da função máxima verossimilhança, assumindo a média como um polinômio de primeira ordem sobre as coordenadas (x, y).

Modelos	$\hat{\beta}$	$\hat{\tau}_2$	$\hat{\sigma}_2$	$\hat{\phi}_2$	AIC	IDE
<b>Matérn / 0.5</b>	<b>0,3863</b>	<b>0,0381</b>	<b>0,1396</b>	<b>3,1854</b>	<b>112,8</b>	<b>1%</b>
Matérn / 1.0	0,3870	0,0745	0,1029	2,5659	113,0	2%
Esférico	0,4049	0,0000	0,1632	4,4006	114,4	0%
Gaussiano	0,3940	0,1014	0,0747	5,2933	113,4	3%
Circular	0,4049	0,0000	0,1638	3,9084	113,2	0%

Nota-se que a variável carbono do solo apresenta dependência espacial, que pode ser descrita pelo modelo Matérn com alcance de 3,1854 m, ou seja, amostras



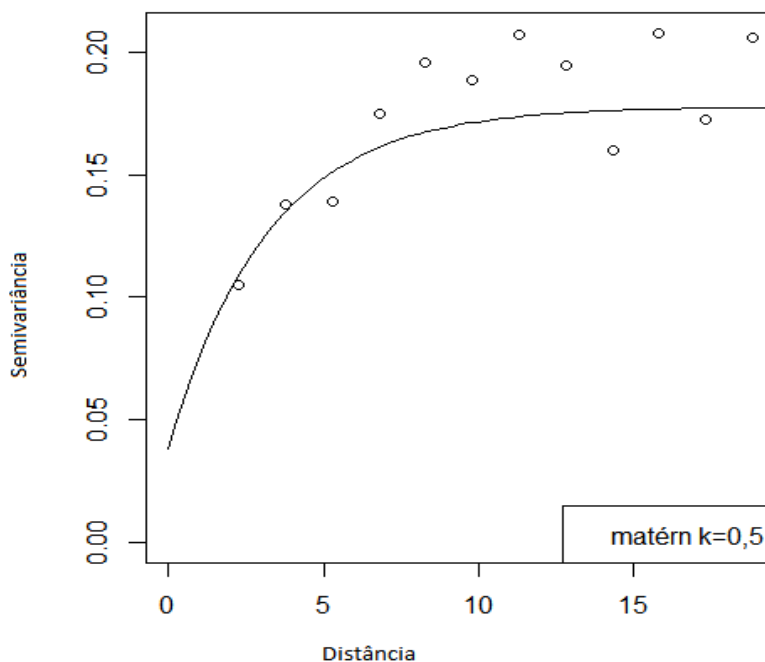


## Encontro Nacional de Educação, Ciência e Tecnologia/UEPB

de carbono do solo selecionadas a distâncias inferiores a 3,1854 m estão correlacionadas entre si.

O parâmetro  $\hat{\beta}$  apresenta valores bem próximos comparando com as outras funções de correlação. O efeito pepita ou “nugget”  $\tau^2$ : corresponde a cota do ponto onde o semivariograma corta o eixo das ordenadas. Demonstra a descontinuidade do semivariograma para distâncias menores do que a menor distância entre as amostras. Componente estrutural ou “sill partial”  $\sigma^2$ : é a diferença entre o patamar  $\tau^2 + \sigma^2$  e o Efeito Pepita. Alcance ou “range”  $\phi_2$ : refere-se à distância dentro da qual as amostras apresentam-se correlacionadas espacialmente. Quanto maior o alcance, maior será a homogeneidade entre as unidades da amostra (Frade, 2011).

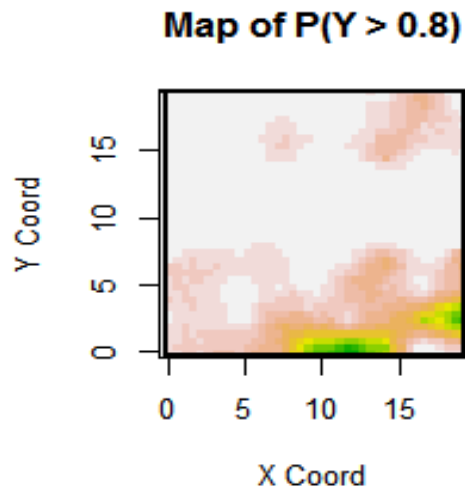
Após essa análise, seleciona-se um modelo através do menor valor do AIC. Para este trabalho o melhor modelo foi o Matérn com Kappa 0.5, com um IDE de 1%, o que indica uma dependência espacial forte, de acordo com a classificação de Cambardella et al. (1994).



**Figura 2** – Semivariograma dos dados de carbono e o modelo Matérn ajustado conforme o Método da Máxima Verossimilhança.

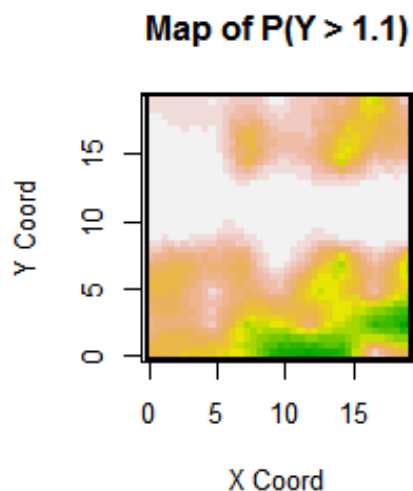


A krigagem é utilizada para estimar o valor de uma variável de interesse em um local onde não foi possível fazer a observação.



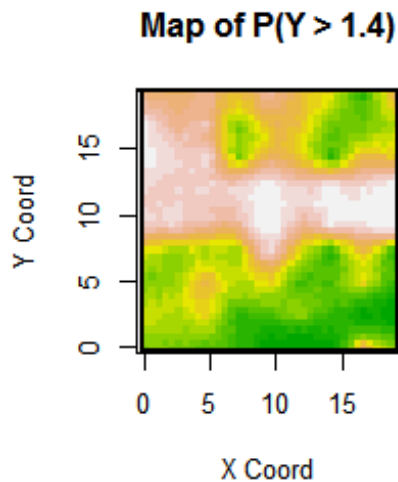
**Figura 3** – Índice de fertilidade no solo com baixo teor de carbono.

Na Figura 3 a cor esbranquiçada, mostra o quanto de carbono existe naquele local, para uma probabilidade de Y ser maior que 0,8.



**Figura 4** - Índice de fertilidade no solo com médio teor de carbono.

A Figura 4 a cor branca, mostra o quanto de carbono existe, para uma probabilidade de Y ser maior que 1,1.



**Figura 5** - Solos com grau de fertilidade alto.

Conforme a Figura 5 a cor branca, identifica o quanto de carbono há no local, para uma probabilidade de Y ser maior que 1,4.

#### **4 CONCLUSÃO**

Todas as funções estudadas apresentam estruturas espaciais bem definidas, existe uma função estrutural com semivariância de comportamento modelável. Para todos os modelos avaliados, a função de correlação que melhor ajustou-se ao semivariograma experimental foi o modelo Matérn com  $Kappa\ 0.5$  apresentando o menor valor de  $A/C$ . Isto significa que as estimativas com o modelo, considerando-se a componente espacial, independente do procedimento de amostragem, trará otimização nas estimativas.

Pelo os mapas da Krigagem nas figuras 3, 4 e 5, a área com a cor branca, presente no local, indica que as amostras são dependentes, ou seja, o carbono está inserido no solo onde a espécie arbórea está plantada. Conclui-se então que a Algaroba que está plantada ao centro, consegue preservar a variável carbono na área. Portanto há uma forte dependência espacial nos dados analisados, a espécie preserva o carbono no solo.



## Encontro Nacional de Educação, Ciência e Tecnologia/UEPB

### REFERÊNCIAS

Agenda do Produtor Rural. Banco do Nordeste, 271 f. 2007.

CAMBARDELLA, C.A. et al. **Fieldscale variability of soil properties in Central Iowa soils**. Soil Science Society of America Journal, v. 58, p. 1501-1511, 1994.

FRADE, D. D. R., **Ajuste de modelos geoestatísticos na determinação da variabilidade espacial de atributos do solo**. 2011. 45 f. Monografia (Estatística) – CCT, Universidade Estadual da Paraíba.

GUIMARÃES, E. C. **Geoestatística Básica e Aplicada**. Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Matemática e Núcleo de estudos estatísticos e biométricos. 2004, 77p. Disponível em:  
<<http://pt.scribd.com/doc/61263725/Geoestatistica-Basica-e-Aplicada>> Acesso dia 03 de maio de 2012.

LANDIM, P. M. B. **Análise estatística de dados geológicos**. 2. ed. rev e ampl. – São Paulo: Editora UNESP, 2003.

MELLO, J. M. de. **Geoestatística aplicada ao inventário florestal**. 2004. 111 f. Tese (Doutorado em Recursos Florestais, com opção em Silvicultura e Manejo Florestal). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Piracicaba.

MELLO, J. M. de, BATISTA, J. L. F., RIBEIRO JÚNIOR, P. J., OLIVEIRA, M. S. de. **Ajuste e seleção de modelos espaciais de semivariograma visando à estimativa volumétrica de *Eucalyptus grandis***. SCIENTIA FORESTALIS, n. 69, p.25-37, dez. 2005.

OLINDA, R. A. de., RIBEIRO JÚNIOR, P. J., MOLIN, J. P. **Uso de técnicas geoestatísticas para determinar a dependência espacial do índice de cone da adequação de malhas amostrais**. 36 p, 2010. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Piracicaba.

R version 2.15.0 (2012-03-30) Copyright (C) 2012 The R Foundation for Statistical Computing ISBN 3-900051-07-0 Platform: i386-pc-mingw32/i386 (32-bit).



## Encontro Nacional de Educação, Ciência e Tecnologia/UEPB

SANTOS, I. P. **Análise da variabilidade espacial dos casos de dengue na capital Rio Branco por meio de técnicas geoestatísticas.** 2011. 40p. Monografia (Graduação) apresentada ao Departamento de Estatística / Centro de Ciências e Tecnologia/ Universidade Estadual da Paraíba.

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, 1980. P. 319-344.