

Variabilidade espacial da taxa de infiltração básica de água no solo em três solos do noroeste do Estado do Paraná

Jefferson Vieira José¹

¹Engenheiro Agrícola, Doutorando em Engenharia de Sistemas Agrícolas - ESALQ/USP, e-mail: jfvieira@usp.br

1 RESUMO

Avaliou-se a variabilidade e a estrutura de dependência espacial da taxa de infiltração básica do solo em áreas experimentais agronômicas na região noroeste do estado do Paraná. Cada área de amostragem foi dividida em 36 subparcelas de 2 x 2 m, sendo que no ponto central de cada subparcela realizou-se um teste de infiltração de água no solo, por meio do infiltrômetro de anéis concêntricos de carga constante, ajustados pelo modelo de Kostiakov, para determinação da taxa de infiltração básica. A caracterização da variabilidade dos resultados foi realizada segundo o resumo estatístico, utilizou-se a transformação das variáveis por meio da família Box-Cox para atender as pressuposições básicas. Por meio do método da máxima verossimilhança foram estimados os parâmetros τ^2 , σ^2 , Φ e $\tau^2 + \sigma^2$. Pelos parâmetros de variabilidade espacial, sugerem-se as distâncias de amostras entorno de 12 e 3 metros para área amostragem do CTI e FEI respectivamente.

UNITERMOS: máxima verossimilhança, propriedades físico-hídricas do solo, dispersão espacial

2 INTRODUÇÃO

O estado do Paraná tem dado avanços importantes na prática da irrigação foi estado da região Sul que apresentou a maior expansão relativa de área irrigada (122%) quando se compara os dois últimos censos agropecuários, de 1996 a 2006. As regiões Noroeste e Norte concentram 70,5% da área irrigada do Estado (PAULINO et al. 2011; IBGE, 2009).

O conhecimento da variabilidade das variáveis físico-hídricas do solo, no espaço e no tempo, é considerado, atualmente, o princípio básico para o manejo preciso das áreas agrícolas. Contudo, ao considerar áreas uniformes quanto às suas variáveis, mesmo em pequenas áreas, podem-se interpretar erroneamente as respostas obtidas às questões existentes, pois a hipótese de ocorrência de dependência espacial estará sendo ignorada (GREGO e VIEIRA, 2005).

No entanto, torna-se necessário a utilização das ferramentas de geoestatística, pois a estatística clássica não permite observar a presença de dependência espacial, uma vez que ela não leva em consideração a distância na qual as amostras foram coletadas no campo (SILVA NETO et al. 2011). Podendo ser aplicada em mapeamentos, orientação de futuras amostragens e modelagens, permitindo, assim, estimar o valor do atributo em locais não amostrados, facilitando a gestão dos recursos naturais (GOMES et al. 2005) e especialmente no manejo de irrigação.

A taxa de infiltração básica (Tib) é uma variável de importância para o entendimento dos processos de retenção, dinâmica da água no solo e a sua absorção pelas plantas. A quantificação desta variável em projetos de irrigação por aspersão é estabelecer a taxa máxima de aplicação de água dos aspersores que serão utilizados, para que não ocorram perdas por escoamento superficial (CALHEIROS et al. 2009).

Em projetos de drenagem do solo, o conhecimento da Tib é essencial para a determinação do tamanho e da distância entre os drenos. A Tib pode também ser um atributo relevante para a localização de represas e canais de condução de água (POTT et al., 2005). O conhecimento da variabilidade espacial da Tib pode contribuir na definição de melhores estratégias para o manejo do solo.

As contribuições e incrementos significativos nas informações de variáveis físico-hídricas a partir da abordagem geoestatística em condições de solos na região noroeste do estado do Paraná são pouco estudados. Diante disso, o objetivo deste trabalho foi estudar em uma parcela experimental a variabilidade espacial da taxa de infiltração básica de água em três solos de diferentes classes texturais e manejo do solo, onde se pratica agricultura irrigada.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área de estudo

Os dados foram coletados em três áreas experimentais agronômicas no noroeste do Estado do Paraná: Centro Técnico de Irrigação (CTI), da Universidade Estadual de Maringá, localizado na latitude 23°23' S e na longitude 51°57' W, com altitude de 504 m; Fazenda Experimental de Iguatemi (FEI), da Universidade Estadual de Maringá, no distrito de Iguatemi, município de Maringá, localizado na latitude 23°21' S e na longitude 52°04' W, com altitude de 561 m; Estação Experimental de Paranavaí do Instituto Agrônomo do Paraná (IAPAR), situada no município de Paranavaí, localizado na latitude 23°05' S e na

longitude 52°26' W, com altitude de 465 m (Figura 1(a)). Na Tabela 1 é apresentada a classificação textural das três áreas amostrais.

Tabela 1. Classificação textural do solo das três áreas amostrais

Áreas amostrais	Areia	Silte	Argila	Classificação do solo
	(g kg ⁻¹)			
CTI	122	121	757	Nitossolo Vermelho distroférico
FEI	710	80	210	Latossolo Vermelho distrófico
IAPAR	892	10	98	Latossolo Vermelho distrófico

CTI - Centro Técnico de Irrigação; FEI - Fazenda Experimental de Iguatemi; IAPAR - Estação Experimental de Paranavaí do Instituto Agrônômico do Paraná

A área de amostragem do CTI permaneceu por mais de dois anos em pousio. Na área de amostragem da FEI, as culturas desenvolvidas nos últimos anos, foram: no verão, milho e, no inverno, aveia. Na área de amostragem do IAPAR, vem sendo pastejada por bovinos sob pastejo de gramínea coastcross (*Cynodon dactylon* Pers.) por aproximadamente 14 anos.

3.2 Estratégia de amostragem no campo

As três áreas amostradas foram divididas em 36 subparcelas de 2 x 2 m, sendo que no ponto central de cada subparcela realizou-se o teste de infiltração de água no solo o método utilizado foi o de infiltrômetro de anéis concêntricos de carga constante de acordo com a metodologia de COELHO et al., (2000) (Figura 1(c)). Com os resultados da lâmina de água acumulada no solo (I) em função do tempo de ensaio (t) obtiveram-se, por regressão linear, os parâmetros (k e α) do modelo de Kostiakov ($I = k t^\alpha$). A taxa de infiltração da água no solo foi obtida derivando-se a equação da lâmina acumulada em relação ao tempo ($TI = dI dt^{-1}$). Para se obter o valor da taxa de infiltração básica de água no solo (Tib), atribui o valor de -0,01 cm h⁻¹ min⁻¹ correspondente a tangente de β igual a 1° :

$$Tib = k.\alpha \left[\frac{-0,01}{k.\alpha.(\alpha - 1)} \right]^{\frac{\alpha-1}{\alpha-2}} \quad (1)$$

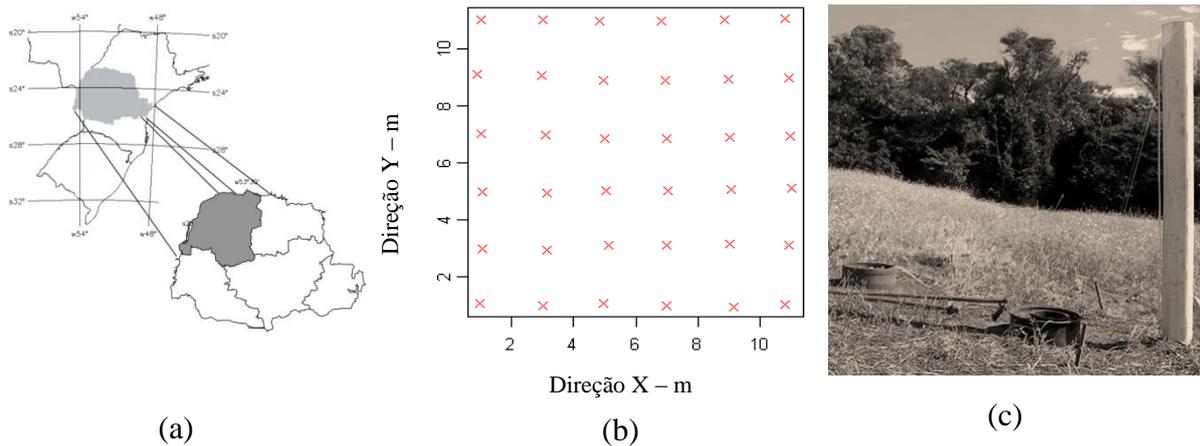


Figura 1. Localização da área de estudo (a), croqui do grid de amostragem (b) e infiltrômetros de anéis concêntricos de carga constante (c).

3.3 Análises dos dados

Para as análises de dados, foi utilizada a linguagem e ambiente de R, versão 2.2.1. (R. DEVELOPMENT CORE TEAM, 2010), os métodos geoestatísticos foram implementadas nas bibliotecas geoR (RIBEIRO e DIGGLE, 2001) e Mass (VENABLES e RIPLEY, 2002).

3.3.1 Análise exploratória dos dados

O conjunto de dados taxa de infiltração básica obtidos nas áreas de amostragem foram submetidos à análise estatística descritiva, determinados os valores mínimos e máximos, média, mediana, desvio-padrão e coeficiente de variação.

Utilizou-se a família de transformações Box-Cox para encontrar a transformação mais adequada para alcançar o comportamento Gaussiano. Essa família depende diretamente de um parâmetro, que é o coeficiente de transformação dos dados. Na prática para um conjunto de dados, obtém-se um intervalo de confiança para que, caso inclua o valor 1, indica que a transformação dos dados não é necessária (BOX e COX, 1964).

3.3.2 Análise geoestatística

A dependência espacial foi analisada por meio de ajuste de semivariograma baseado nas pressuposições de estacionariedade da hipótese intrínseca (VIEIRA, 2000), estimado pela equação (2):

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

em que, $\gamma^*(h)$ é a estimativa da semivariância experimental, obtida pelos valores amostrados $[Z(x_i), Z(x_i + h)]$, h é a distância entre pontos amostrais e $N(h)$ é o número total de pares de pontos possíveis, dentro da área de amostragem, com a distância h .

Na Figura 2, o ponto em que os dados deixam de apresentar dependência espacial é chamado de patamar (sill) ($\sigma^2 + \tau^2$), e a distância a partir da origem até o patamar é chamada de alcance (range), que é função do parâmetro ϕ . Pela definição, $\hat{\gamma}(u)$ para $u = 0$ deverá ser zero, denominado efeito-pepita (nugget), que nos modelos considerados correspondem à variância τ^2 .

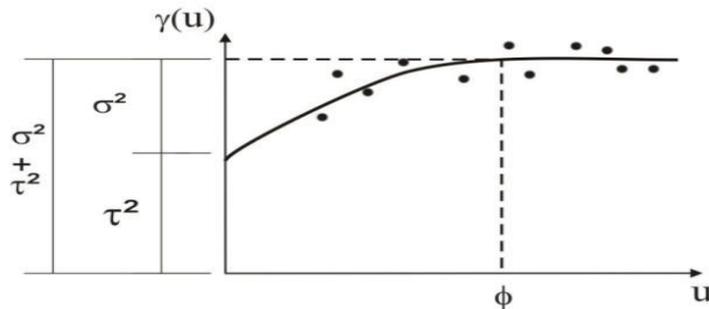


Figura 2. Semivariograma teórico.

Os variogramas empíricos foram necessários para obter variogramas baseados em modelos e seus parâmetros obtidos por máxima verossimilhança. Os valores iniciais dos parâmetros do modelo exponencial encontram-se na Tabela 2.

Tabela 2. Resultados dos valores iniciais para os parâmetros do modelo exponencial nas três áreas amostrais.

Parâmetros	Áreas amostrais		
	CTI	IAPAR	FEI
τ^2	0,07	0,06	0,15
σ^2	0,58	0,48	0,31
ϕ	3,45	8,45	3,95

Para classificação do grau da dependência espacial (GDE) foi feita com base na razão entre o efeito pepita e o patamar $\left\{ \left[\frac{c_0}{(c_0+c_1)} \right] - 1 \right\}$, sendo considerada forte se a razão for $\geq 0,75$, moderada quando está entre 0,74 e 0,26 e fraca se $\geq 0,25$ (CAMBARDELLA et al. 1994).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise exploratória dos dados

Pela estatística descritiva dos dados apresentado na Tabela 3, observa-se que os valores das medidas de tendência central média e mediana para Tib das áreas estudadas, não são semelhantes, o que identifica uma distribuição assimétrica, conforme constatado por CALHEIROS et al. (2009).

Com base no critério de Warrick e Nielsen (1980) para classificar o coeficiente de variação – CV (baixo – $CV < 12\%$, médio – $12\% < CV < 60\%$, alto – $CV \geq 60\%$), verificou-se que eles são altos para as três áreas amostrais. Os resultados obtidos são concordantes com aqueles obtidos por EGUCHI et al., (2003) e AMARO FILHO et al., (2007). FARIAS (1999) destaca que a Tib possui alta variabilidade ($153,55\% < CV < 228,92\%$) e não apresenta estrutura de dependência espacial definida.

Tabela 3. Análise exploratória da taxa infiltração da água no solo (mm h^{-1})

Estatística	CTI	FEI	IAPAR
Nº elementos amostrais	36	36	36
Média	45,71	22,61	31,70
Mínimo	8,33	5,34	6,76
1º Quartil	19,01	15,35	15,68
Mediana	38,79	18,99	25,87
3º Quartil	57,55	22,54	43,01
Máximo	136,80	76,59	89,37
Desvio-padrão	30,97	20,16	16,56
CV (%)	76,38	69,05	67,09

CV: Coeficiente de Variação.

Na Figura 3 podem ser vistos o gráfico boxplot, os pontos que produzem alta variabilidade aos dados e distorção destes em torno da média, prejudicando sua normalidade e denominados outliers. Embora existam valores que distanciam dos conjuntos de dados, não foram considerados outliers, pois são valores semelhantes aos valores vizinhos.

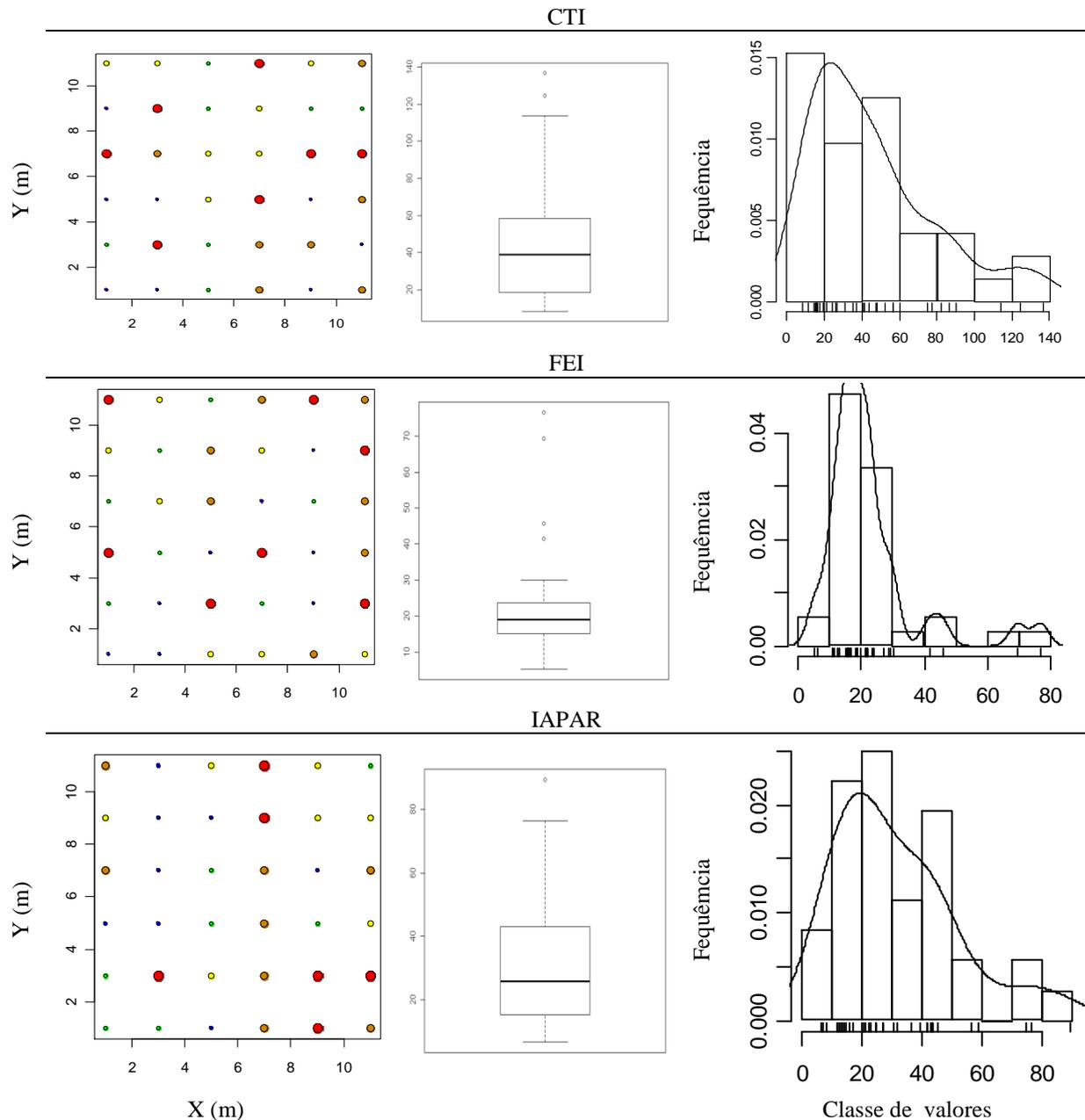


Figura 3. Dispersão da taxa de infiltração básica de água no solo nas três áreas.

Ainda pode ser observado na Figura 3 a distribuição dos histogramas de frequências das diferenças entre os pontos amostrados; a existência de normalidade dessas diferenças é de fundamental importância em estudos que utilizam os algoritmos de máxima verossimilhança, a qual consiste da aplicação de um modelo multivariado normal (RIBEIRO JUNIOR e

DIGGLE, 2001). Pode-se verificar a assimetria à direita da distribuição mostrada na Figura 3, uma possível distribuição log normal, comum para esta variável do solo.

Na Figura 4, observa-se o gráfico do perfil de verossimilhança do parâmetro da transformação Box-Cox. Os resultados das estimativas do parâmetro da família de transformações Box-Cox com os respectivos intervalos de confiança dos conjuntos de dados CTI, FEI e IAPAR, verificando-se que os modelos não tiveram distribuição aproximadamente normal, o que identifica uma distribuição assimétrica, conforme constatado por EGUICHI et al. (2003), MONTENEGRO e MONTENEGRO (2006). Como os intervalos de confiança incluem o valor 0, adotou-se em todos os casos a transformação em Log.

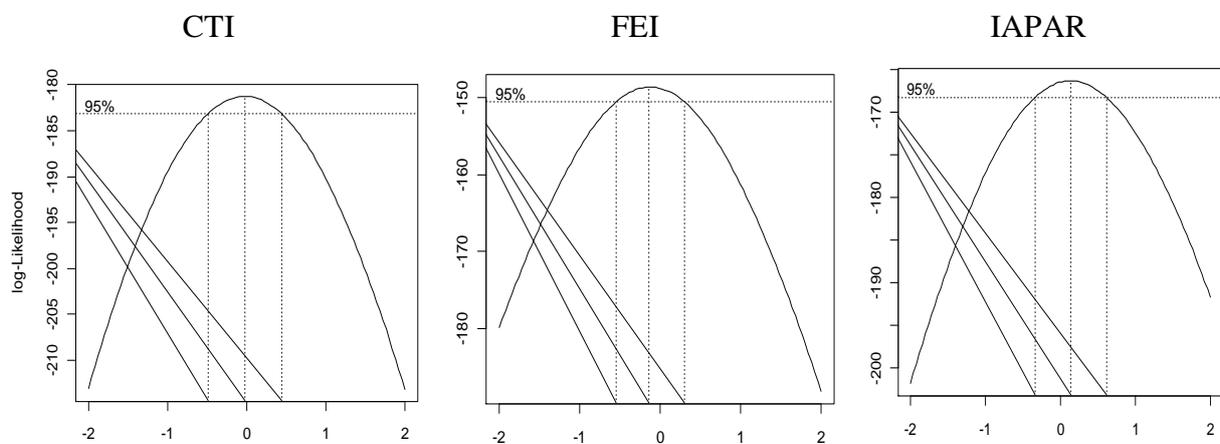


Figura 4. Transformação Box-Cox

4.2 Análise Geoestatística

Pressupõem-se a tendência de estacionaridade, cujos dados, tem média e variância considerados como constante. Portanto os modelos foram ajustados para os semivariogramas, apresentados os resultados das estimativas dos parâmetros (τ^2 , σ^2 e ϕ) da função de verossimilhança (Tabela 4). Para as três áreas estudadas ajustadas ao modelo exponencial sugerido por GOMES et al., (2007).

Tabela 4. Estimativas dos parâmetros utilizando-se os estimadores de máxima verossimilhança para modelo exponencial de correlação

Parâmetros	CTI	FEI*	IAPAR
Efeito pepita (τ^2)	0,3963	0,2885	0,0020
Patamar ($\sigma^2 + \tau^2$)	0,5319	-	0,4318
Alcance (ϕ)	3,9923	-	1,1064
β_0	3,5583	2,9640	3,2648
GDE	0,25	-	0,99

GDE: grau de dependência espacial; *efeito de pepita puro

De acordo com o critério de CAMBARDELLA et al. (1994), a área amostral do CTI apresentou fraca dependência espacial, enquanto a área amostral do IAPAR apresentou forte dependência espacial (Tabela 4). Segundo SILVA et al., (2003) e MACHADO et al., (2007), isso demonstra que os semivariogramas explicam a maior parte da variância dos dados amostrais. Os dados de Tib para a área do CTI permitiram ajuste ao modelo exponencial, com alcance de dependência espacial de 11,97 m. Na área do IAPAR o alcance de dependência espacial foi de 3,31 m.

MIGUEL et al. (2009) avaliaram a variabilidade de infiltração de água no solo em duas profundidades e encontraram dependência espacial de moderada a forte, caracterizando assim necessidade da utilização de ferramenta da krigagem ordinária, a fim de se delimitarem possíveis zonas de manejo diferenciado.

Outra observação importante referente aos semivariogramas foi a Tib da área amostral da FEI que apresentou um efeito pepita puro, sendo o único ajuste dessa natureza. Segundo GOMES et al., (2007), esse fato reflete a alta variabilidade apresentada por essa variável, sendo que, a ocorrência do efeito pepita puro permite inferir que as amostras para estudo de Tib, nesta parcela experimental, devem ser feitas a distâncias menores que as utilizadas na amostragem deste trabalho assegurando maior precisão das pesquisas como sugerido também por OLIVEIRA et al. (2006).

4.2.2. Predição Espacial

Para estimativa de valores em locais não amostrados, foi gerado mapas de distribuição espacial (Figura 5), sendo estes obtidos por interpolação por meio da krigagem, a partir dos parâmetros dos modelos ajustados aos semivariogramas.

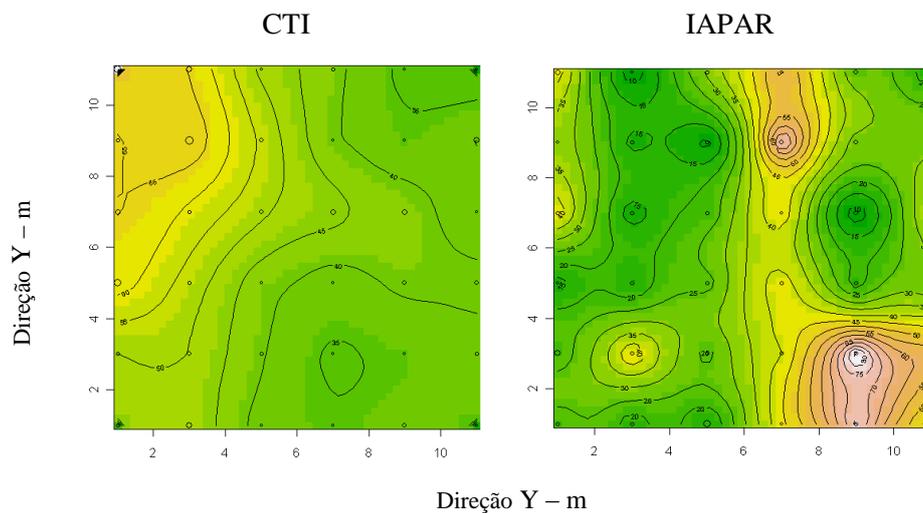


Figura 5. Distribuição espacial da Tib estudadas nas áreas de amostragem

Para a construção do mapa de probabilidade de escoamento superficial teve como critério uma intensidade de aplicação dos aspersores utilizadas em experimentos de cada área de amostragem estudada (Figura 6). Para área de amostragem do CTI, utilizou uma intensidade de aplicação dos aspersores de 12 mm h^{-1} (FRIZZONE et al. 2007), na área de amostragem do IAPAR, utilizou uma intensidade de aplicação de $6,9 \text{ mm h}^{-1}$ (ALMEIDA et al. 2011).

Na Figura 6, observa-se o mapa de probabilidade para predição da ocorrência para que a intensidade de aplicação de água dos aspersores exceda a Tib, ocorrendo perda por escoamento superficial. Verifica-se baixa probabilidade de ocorrência de escoamento superficial para duas áreas de amostragem, apresentando um adequado dimensionamento dos sistemas de irrigação por aspersão.

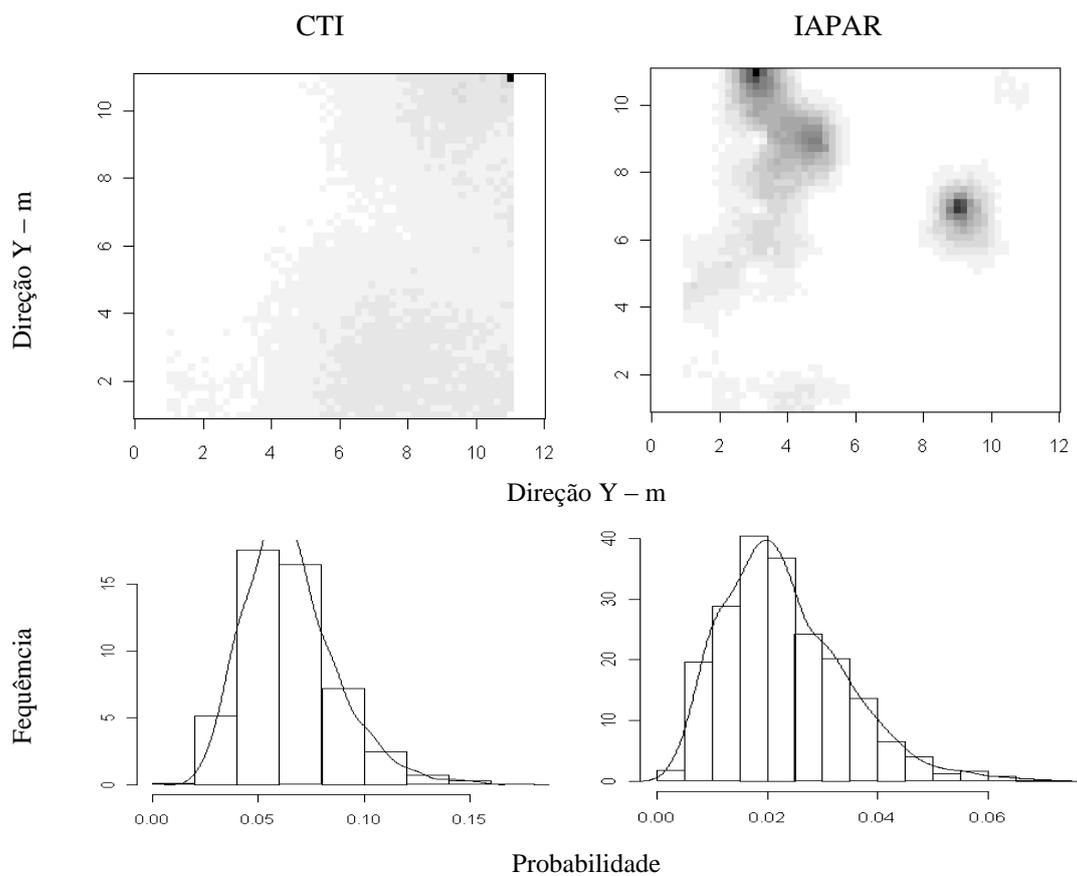


Figura 6. Mapa de probabilidade da intensidade de aplicação dos aspersores de 6,9 e 12 mm h⁻¹ dos aspersores excede a permeabilidade do solo, ocorrendo perdas por escoamento superficial.

6 CONCLUSÃO

Verificou-se estrutura de dependência espacial para área experimental do CTI e FEI, sendo somente forte a variável Tib da área amostragem da FEI.

Pelos parâmetros de variabilidade espacial, sugerem-se as distâncias entre amostras de 3 e 12 metros para Tib nas áreas CTI e FEI, respectivamente.

7 REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, E. L. D. de. **Irrigação de plantas forrageiras tropicais e sorgo granífero na região do arenito Caiuá - Paraná**. 2011. 65f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2011.
- AMARO FILHO, J.; NEGREIROS, R.F.D.; ASSIS JÚNIOR, R.N. & MOTA, J.C.A. Amostragem e variabilidade espacial de atributos físicos de um Latossolo Vermelho em Mossoró, RN. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 31:415-422, 2007.
- BOX, G. E. P.; COX, D. R. An Analysis of transformations. **Journal of the Royal Statistical Society**, v.26, n.2, p.211-252, 1964.
- CALHEIROS, C. B. M. et al. Definição da taxa de infiltração para dimensionamento de sistemas de irrigação por aspersão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 13, n. 6, p. 665-670, 2009.
- 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 of America Journal*, Madison, v.58, n. 5, p. 1501-1511, 1994.
- DIGGLE, P. J.; RIBEIRO JR, P. J. Model based geostatistics. New York: Springer, 2007. 230p.
- EGUCHI, E. S.; SILVA, E. L.; OLIVEIRA, M. S. Variabilidade espacial da condutividade hidráulica do solo saturado e da taxa de infiltração básica determinadas “in situ”. **Ciência Agrotecnologia**, Lavras, Edição especial p.1607-1613, 2003.
- FARIAS, M. S. S. **Diagnóstico da necessidade de drenagem no perímetro irrigado de São Gonçalo**. 1999. 75f. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Paraíba, Campina Grande, 1999.
- FRIZZONE, JOSÉ A.; REZENDE, ROBERTO; GONCALVES, ANTONIO C. A.; HELBEL JUNIOR, Celso. Produtividade do feijoeiro sob diferentes uniformidades de distribuição de água na superfície e na subsuperfície do solo. **Engenharia Agrícola**. v.27, n.2, pp. 414-425 2007.
- GOMES, N. M.; FARIA, M. A. de; SILVA, A. M. da; MELLO, C. R. de; VIOLA, M. R. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo associados ao uso e ocupação da paisagem. **Revista Brasileira de engenharia agrícola e ambiental**, Campina Grande, vol.11, n.4, p. 427-435. 2007.
- R DEVELOPMENT CORE TEAM R. A language and environment for statistical computing. Vienna, R Foundation for Statistical Computing, 2005. URL <http://www.R-project.org>
- RIBEIRO JR., P. J.; DIGGLE, P. J. The geoR package functions for geostatistical data analysis: **R.News**, v.1, n.2, p.15-18, 2001.

- RIBEIRO JÚNIOR, P. J. **Métodos geoestatísticos no estudo da variabilidade espacial de parâmetros do solo**. 1995. 99f. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 1995.
- SILVA NETO, S. P. da; SANTOS, A. C. dos; LEITE, R. L. de L.; DIM, V. P.; CRUZ, R. S. da; PEDRICO, A.; NETO, D. N. das N.; Análise espacial de parâmetros da fertilidade do solo em região de ecótono sob diferentes usos e manejos. **Ciências Agrárias**, Londrina, v. 32, n. 2, p. 541-552, abr/jun. 2011.
- VIEIRA, S.R. **Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo**. In: NOVAIS R.F.; ALVAREZ, V., V.H. & SCHAEFER, G.R., Tópicos em ciência do solo. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v.1, p.1-54.
- ZIMMERMANN, B., E. ZEHE, N. K. HARTMANN, AND H. ELSENBEEER. Analyzing spatial data: An assessment of assumptions, new methods, and uncertainty using soil hydraulic data, **Water Resour. Res.**, 44, 2007.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Censo agropecuário – 2006. Rio de Janeiro, 2009.
- PAULINO, J.; FOLEGATTI M.V.; ZOLIN, C.A.; SÁNCHEZ-ROMÁN, R.M.; JOSÉ, J.V.; Situação da agricultura irrigada no brasil de acordo com o censo agropecuário 2006. **Irriga**, Botucatu, v. 16, n. 2, p. 163-176, abril-junho, 2011.