

## **GEOESTATÍSTICA E SIMULAÇÕES CONDICIONAIS APLICADAS A ENSAIOS DE UNIFORMIDADE DE ASPERSÃO CONVENCIONAL**

Acácio Perboni<sup>1</sup>, Jeferson Vieira José<sup>1</sup>, Mario Nestor Ullmann<sup>2</sup>, Olivio José Soccol<sup>2</sup>, José Antonio Frizzone<sup>1</sup>

1 – Departamento de Engenharia de Biossistemas, ESALQ/USP, Av. Pádua Dias, 11, C.P 9, 13418-900, Piracicaba – SP, acacioperboni@usp.br

2 - Departamento de Agronomia, CAV/UEDESC, Av. Luiz de Camões, 2090, Conta Dinheiro, 88.520-000, Lages – SC

**RESUMO:** Este trabalho teve como objetivo avaliar a variabilidade e a estrutura de dependência espacial de 5 diferentes ensaios de uniformidade de irrigação por aspersão convencional. A amostragem da distribuição de água na área foi realizada, distribuindo 48 coletores na forma de malha retangular. Caracterizou-se a variabilidade dos resultados por meio de estatísticas descritivas. Para atender aos pressupostos do modelo geoestatístico adotado, utilizou-se transformação da família Box-Cox da variável resposta. Por meio do método da máxima verossimilhança foram estimados os parâmetros efeito-pepita ( $\tau^2$ ), variabilidade espacial ( $\sigma^2$ ) e alcance ( $\phi$ ). Baseando-se em simulações, a área foi dividida em classes de lâminas, e probabilidades de ocorrência de lâminas menores que um valor arbitrário de 6 mm. Determinando a porcentagem de área que recebe cada lâmina, pode-se relacionar com o tempo de irrigação necessário para que uma porcentagem da área total seja adequadamente irrigada.

**Palavras-chave:** irrigação; distribuição espacial; máxima verossimilhança

## **GEOSTATISTICS AND CONDITIONAL SIMULATIONS APPLIED TO TEST UNIFORMITY OF CONVENTIONAL SPRINKLER**

**ABSTRACT:** This study aimed to assess the variability and spatial dependence structure of 5 different tests of uniformity of conventional sprinkler irrigation. The sampling distribution of water in the area was carried out by distributing 48 collectors in the form of a grid. Characterized the variability of results by using descriptive statistics. To meet the assumptions of geostatistical model adopted, we used transformation of Box-Cox family of the response variable. Through the method of maximum likelihood parameters were estimated nugget-effect ( $\tau^2$ ), spatial variability ( $\sigma^2$ ) and range ( $\phi$ ). Based on simulations, the area was

divided into classes of blades, and blade probability of an arbitrary value smaller than 6 mm. Determining the percentage area which receives each blade, one can relate the irrigation time required for a percentage of the total area is properly irrigated.

**Keywords:** irrigation; spatial dispersion; maximum likelihood

## INTRODUÇÃO

Atualmente, o conceito de uniformidade de distribuição da água em irrigação por aspersão tem tido um grande avanço. Devido à crescente necessidade de conservação do recurso água; à competitividade pela água; ao custo da energia; ao custo dos insumos, e à estabilização dos preços dos produtos agrícolas, os sistemas de irrigação e os métodos de manejo da água devem proporcionar uma aplicação uniforme e eficiente (HEINEMANN et al., 1998).

De acordo Paulino et. al (2011) o Brasil teve um aumento na área irrigada de 1,3 milhões de hectares, ou seja, 42% em 10 anos, sendo que a irrigação por aspersão (convencional e autopropelido), representava 1.572.960 hectares, aproximadamente 35% da área total irrigada no Brasil.

Entretanto, a crescente utilização da água para fins de irrigação tem despertado a preocupação da opinião pública e das lideranças políticas, em razão dos impactos causados ao ambiente pela inadequada utilização das águas pelos irrigantes (Martins et al. 2012).

No caso da aspersão convencional os cuidados devem ser maiores quando se trata das perdas durante a aplicação de água, as quais são mais significativas e dependentes do equipamento em uso (Martins et al. 2012).

Na determinação das perdas de água por evaporação e arraste em ensaios de campo utilizando 4 diferentes aspersores de tamanho médio, Beskow et al. (2008) encontraram valores médios de perdas variando de 8,5 a 39,8 % para ensaios com apenas 1 aspersor, e perdas de 4,7 a 18,9 % para ensaios com laterais de aspersores. Ainda com base nos resultados dos testes de campo os autores, concluíram que: (i) as perdas de água por evaporação e arraste apresentaram tendência geral em aumentar com o acréscimo da temperatura, déficit de pressão de vapor e velocidade do vento e com o decréscimo da umidade relativa do ar, sendo mais influenciadas pelo diâmetro do bocal do que pela pressão de operação; (ii) nos testes de campo com um único aspersor, as perdas de água por evaporação e arraste foram bastante superiores as perdas obtidas com laterais de aspersores funcionando simultaneamente; e (iii) o diâmetro do bocal do aspersor exerce grande

influência no valor das perdas de água por evaporação e arraste, podendo acarretar em perdas maiores que as apresentadas por muitos autores.

Além das perdas características dos sistemas de irrigação por aspersão convencional, é necessário conhecer a uniformidade de distribuição espacial de água, uma vez que determinados locais da área irrigada recebem mais que a lâmina necessária pela cultura, sofrendo estresse por excesso hídrico e outros locais recebem menos que a lâmina necessária, sofrendo estresse por déficit hídrico.

Os fatores que comprometem a uniformidade de distribuição da água podem ser considerados em climáticos e não-climáticos. Os fatores climáticos são: evaporação, temperatura do ar, umidade relativa e condições locais do vento. Os fatores não-climáticos são os relacionados ao equipamento e ao método de avaliação. Quanto ao equipamento, os fatores são: pressão de operação do emissor, velocidade e alinhamento da linha lateral do equipamento, e altura do emissor (HEINEMANN et al. 1998).

Azevedo et al. (2000) realizaram um estudo para avaliar a uniformidade de distribuição de água em um sistema de irrigação por aspersão e observaram que a velocidade do vento foi o fator que mais influenciou na uniformidade, seguido pela pressão de serviço, espaçamento entre aspersores na linha lateral, espaçamento entre linhas laterais, direção do vento em relação à linha lateral e velocidade de rotação do aspersor.

Muitos autores consideram o Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC), como o parâmetro principal para calcular a uniformidade de irrigação. Um sistema com CUC de 80% significa que aproximadamente 80% da área receberão lâmina maior ou igual à lâmina média de aplicação (REZENDE et al., 1998).

Em seu estudo Azevedo et. al (2000) observaram que o aumento da velocidade do vento e do espaçamento entre aspersores diminui o CUC, enquanto o aumento da pressão de operação do aspersor o elevou nos intervalos estudados.

Além do CUC, pesquisadores aplicaram com sucesso, outras técnicas para determinar a variabilidade espacial de lâminas de irrigação. Nakamura et. al (2011) simularam diferentes espaçamentos entre aspersores e usaram a geoestatística para visualizar as condições de sobreposição das lâminas de irrigação. Para todos os espaçamentos adotados, foi encontrada forte dependência espacial, permitindo o uso de modelos geoestatísticos, usados na técnica de krigagem para gerar os mapas de isolinhas de lâminas de irrigação.

A predição espacial feita pela krigagem, embora válida, não permite determinar o intervalo de confiança das previsões realizadas por esta simulação, pois foi gerado apenas um processo. A geração de simulações condicionais pelo método de Monte Carlo permite,

simular vários cenários de distribuição da lâmina na área, baseados nos parâmetros e modelos previamente definidos, por isso o nome condicional.

Neste contexto, este trabalho tem como objetivo simular vários cenários diferentes e gerar mapas de probabilidade de ocorrência de determinada lâmina, dividindo a área em classes, que recebem determinada lâmina. Além disso, com base nos diferentes cenários gerados, serão construídos mapas de probabilidades de áreas receberem menos que a lâmina crítica.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Área de estudo

Os dados foram coletados em cinco diferentes ensaios de uniformidade de aspersão convencional, realizados no departamento de Agronomia, do Centro de Ciências Agroveterinárias da Universidade do Estado de Santa Catarina, localizado no município de Lages – SC, cujas coordenadas geográficas são: 27° 47' 33" de latitude Sul, 50° 18' 18" de longitude Oeste e altitude média de 640 metros

Todos os 5 ensaios foram realizados no mesmo local, área plana (campo de futebol), a água utilizada nos ensaios foi bombeada de um reservatório subterrâneo localizado sob o laboratório de hidráulica até o local dos ensaios, a vazão foi medida com medidor do tipo Venturi. Foram utilizadas duas linhas laterais com quatro aspersores cada (Figura 1), para determinar a vazão média aplicada por cada aspersor, dividiu-se a vazão medida no medidor Venturi por 8 aspersores. A precipitação média aplicada por um aspersor, foi calculada pela eq. (1).

$$\bar{P}_{apl} = \frac{1000 Q}{A} \frac{1}{8} = \frac{1000 \bar{q}}{A} \quad (1)$$

em que:

$\bar{P}_{apl}$  - é a precipitação média aplicada pelo aspersor, em mm h<sup>-1</sup>;

Q - é a vazão medida no medidor Venturi, em m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>;

$\bar{q}$  - é vazão média aplicada por um aspersor, em m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>.

A - é a área irrigada por um aspersor, em m<sup>2</sup>;

A temperatura e umidade relativa do ar, velocidade e direção do vento foram medidas em uma estação meteorológica, próxima ao local de ensaio. O tempo de duração dos ensaios foi cronometrado e a pressão de serviço medida com um manômetro do tipo Bourdon,

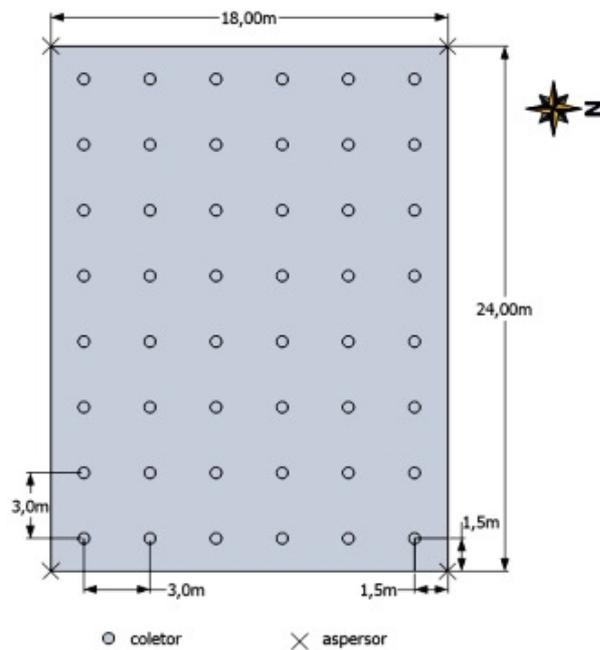
instalado no tubo de subida do segundo aspersor da segunda linha lateral, após foi corrigida para o centro do bocal do aspersor.



**Figura 1** – Ensaio de uniformidade.

### **Estratégia de amostragem**

Foram distribuídos 48 coletores com área de 53,63 cm<sup>2</sup> a uma altura média de 5 cm do solo, entre as duas linhas laterais e entre o segundo e o terceiro aspersores da linha lateral, conforme Figura 2. As linhas laterais foram compostas com tubos de PVC, com comprimento de 66 m e diâmetro de 50 mm, o espaçamento entre aspersores foi de 18 x 24 metros. As ligações entre as linhas laterais e os aspersores foram feitas com tubos de subida de PVC com 25 mm de diâmetro e 0,83 m de comprimento. Os aspersores utilizados foram da marca Plona, modelo PA100, com diâmetro de bocais de 7 x 3 mm.



**Figura 2** – Croqui da distribuição dos coletores.

Após o término dos ensaios, foi medido o volume de água em cada coletor com proveta graduada, o volume dividido pela área do coletor, forneceu a lâmina coletada. Dividindo a lâmina pela duração do ensaio, obteve-se a precipitação coletada para cada coletor. Somando lâminas e precipitações dos 48 coletores e dividindo por 48, obteve-se a lâmina média coletada e a precipitação média coletada, respectivamente. A eficiência de aplicação foi calculada, pela eq. (2).

$$E_a = 100 \frac{\bar{P}_{col}}{\bar{P}_{apl}} \quad (2)$$

em que:

$E_a$  – é a eficiência de aplicação, em %;

$\bar{P}_{col}$  - é a precipitação média coletada, em  $\text{mm h}^{-1}$ ;

$\bar{P}_{apl}$  - é a precipitação média aplicada pelo aspersor, em  $\text{mm h}^{-1}$ ;

Para expressar a dispersão da lâmina de irrigação coletada, foi utilizado o coeficiente de uniformidade de Christiansen (1942), expresso pela eq. (3).

$$CUC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N |x_i - \bar{x}|}{N \cdot \bar{x}} \quad (3)$$

em que:

CUC – é o coeficiente de uniformidade de Christiansen, adimensional;

$x_i$  – é a i-ésima lâmina coletada, em mm;

$\bar{x}$  - é a lâmina média coletada, em mm;

N – é o número de coletores.

### **Análises dos dados**

Para as análises de dados, foi utilizada a linguagem e ambiente R, versão 2.15.1. (R. DEVELOPMENT CORE TEAM, 2012). Os métodos geoestatísticos e simulações condicionais foram implementadas utilizando funções disponíveis no pacote geoR (RIBEIRO e DIGGLE, 2001). Para encontrar a área correspondente a cada classe de dados foi utilizado o pacote classInt (BIVAND et. al, 2012).

### **Análise exploratória dos dados**

Os dados de lâmina coletada obtidos nos ensaios foram divididos pela duração do ensaio para transformar em precipitação coletada e após submetidos à análise estatística descritiva, determinando os valores mínimos, máximos, quartis e média. Utilizou-se a família de transformações Box-Cox (BOX e COX, 1964), para encontrar a transformação mais adequada para alcançar o comportamento aproximadamente Gaussiano, utilizou as equações (4) e (5). Para valores iguais a 1, os dados são considerados normais, não sendo necessária a transformação.

$$y^\lambda = \frac{y^\lambda - 1}{\lambda}; \text{ para } \lambda \neq 0 \quad (4)$$

$$y^\lambda = \ln(y); \text{ para } \lambda = 0 \quad (5)$$

### **Análise geoestatística**

Os dados foram analisados sob a abordagem de modelos geoestatísticos (DIGGLE e RIBEIRO JR., 2007) sob o paradigma frequentista da estatística. Buscou-se, desta forma, ajustar os parâmetros do modelo, equação (6):

$$Y(X_i) = \beta + S(X_i) + \varepsilon_i \quad (6)$$

Em que:

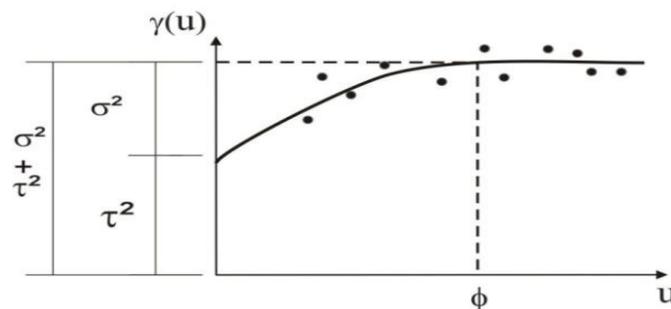
$Y(X_i)$  é a lâmina na linha i da matriz de coordenadas X;

$\beta$  é a média geral de uma área específica;

$S(X_i)$  é um processo gaussiano com função do modelo com parâmetro de variância  $\sigma^2$  e parâmetro de alcance  $\phi$ ;

$\epsilon_i$  é o ruído aleatório normalmente distribuído com média zero e variância  $\tau^2$ .

Na Figura 3, 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  $\phi$ . Ao extrapolarmos a curva do semi variograma para a distância zero, podemos chegar a um valor não nulo de semivariância. Este valor recebe o nome de efeito pepita (Nugget), que nos modelos considerados correspondem à variância  $\tau^2$ .



**Figura 3.** Semivariograma teórico.

### Simulações condicionais

As simulações condicionais realizadas são resultados das estimativas baseadas em 1000 cenários diferentes e não apenas um, como é o caso da krigagem. Baseando-se nos 1000 cenários, foram determinadas as probabilidades de ocorrência de lâmina menor que 6 mm. O esforço computacional para simulação, depende do grid de predição adotado, para o nosso caso, um grid de 50 colunas com 50 pontos em cada coluna. Isso resulta em um total de 2500 (50 x 50) pontos a serem estimados. Como realizamos 1000 simulações, teremos uma matriz resultante com 2500 linhas x 1000 colunas. Cada linha desta matriz representa um ponto e cada coluna, uma simulação.

### Divisão das lâminas em classes

As áreas relativas a cada classe, foram obtidas a partir da contagem do número de pixels até o limite da classe em relação ao número total de pixels, que corresponde a 100 % da área (18x24 m). Cada pixel é representado por um ponto do grid adotado, totalizando 2500 pixels.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 1, são apresentados os dados técnicos e climáticos observados durante a execução dos testes no campo. Observa-se que os testes foram realizados em condições climáticas com alta amplitude de variação, ou seja, velocidades médias de vento (0 a  $1,5 \text{ m s}^{-1}$ ), umidade relativa média do ar (27 a 68%) e de temperatura (13,6 a  $28,7^\circ\text{C}$ ).

No ensaio um a precipitação média aplicada pelo aspersor foi menor ( $9,07 \text{ mm h}^{-1}$ ), com tempo de irrigação de 1,094 h. Os testes restantes apresentaram precipitação média aplicada pelo aspersor com valores de baixa amplitude ( $9,40$  a  $9,48 \text{ mm h}^{-1}$ ) com duração de irrigação de 0,750 a 1,094 h.

**Tabela 1** – Condições climáticas, pressão de serviço e precipitação média aplicada.

Ensaio	Data	T ( $^\circ\text{C}$ )	UR (%)	Vv ( $\text{m s}^{-1}$ )	Dv	t (h)	PS (KPa)	$\bar{P}_{\text{apl}}$ ( $\text{mm h}^{-1}$ )
1	29/05/2003	13,6	68	0	N	1,094	332,76	9,07
2	08/12/2003	•	•	•	•	1,000	385,53	9,42
3	20/05/2006	22,1	58,5	1,5	NE	0,750	389,95	9,40
4	24/08/2006	22,8	27	1,5	NE	0,917	382,39	9,48
5	08/11/2007	28,7	40	0,5	NE	0,917	412,02	9,41

T – temperatura, em  $^\circ\text{C}$ ; UR – umidade relativa do ar, em %; Vv – velocidade do vento, em  $\text{m s}^{-1}$ ; Dv – direção do vento; t – duração do ensaio, em h; PS - pressão de serviço, em KPa;  $\bar{P}_{\text{apl}}$  – precipitação média aplicada pelo aspersor, em  $\text{mm h}^{-1}$ ; • - dados não medidos.

### Análise exploratória dos dados

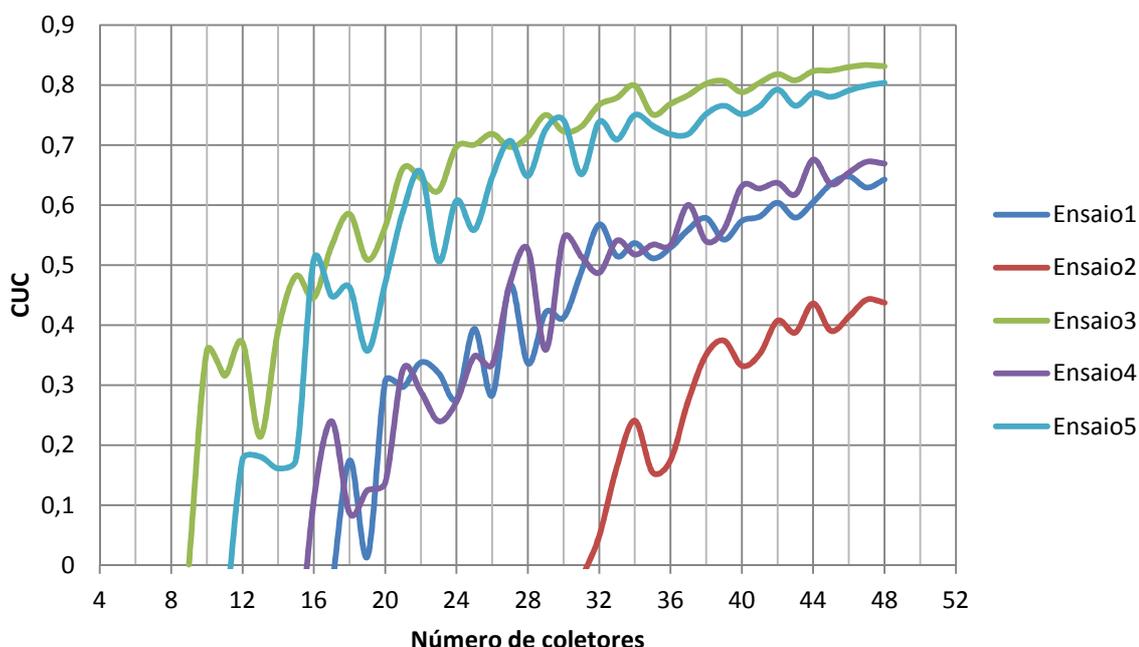
Pela estatística descritiva dos dados de precipitação coletada apresentados na Tabela 2, observa-se que os valores das medidas de tendência central média e mediana (2º quartil), não são semelhantes, o que identifica uma distribuição assimétrica, sendo necessária a transformação dos dados.

**Tabela 2.** Análise exploratória da precipitação coletada ( $\text{mm h}^{-1}$ ).

Ensaio	minima	1º quartil	2º quartil	3º quartil	máxima	média	Ea (%)
1	3,58	6,78	8,52	9,89	12,02	$8,11 \pm 0,31$	89,47
2	0,93	4,43	7,13	10,70	17,34	$7,66 \pm 0,61$	81,34
3	2,73	5,22	7,09	8,70	11,19	$6,91 \pm 0,36$	73,53
4	1,02	4,78	6,71	8,98	14,04	$6,96 \pm 0,48$	73,44
5	4,07	6,28	7,07	8,65	11,80	$7,52 \pm 0,26$	79,95

Ea – eficiência de aplicação, em %.

Na Figura 4 são apresentados os valores de CUC medidos para os ensaios usando 48 coletores e simulados para números de coletores menores que 48. Por meio de sorteio retirou-se coletores, que foram excluídos do cálculo do CUC, com o objetivo de observar se o número de amostras foi suficiente para avaliar a uniformidade de aspersão.



**Figura 4** - Valores de CUC medido para 48 coletores e simulados para números de coletores menores que 48.

Para todos os ensaios, foi atingido um patamar antes de 48 coletores, indicando que o número de coletores foi suficiente para avaliar a uniformidade usando o CUC. Os parâmetros que qualificam a uniformidade de aplicação de água dos sistemas de irrigação, os quais consideram excelente a uniformidade quando apresenta coeficientes acima de 90%, bom de 80-90%, regular de 70-80%, ruim 70-60% e inaceitável abaixo de 60% (BERNARDO et al. 2008).

### Análise Geoestatística

Para atender a hipótese de estacionaridade, cujos dados, tem média e variância considerados como constante, foram usadas transformações box-cox. Modelos foram ajustados aos semivariogramas, na Tabela 3 são apresentados os resultados das estimativas dos parâmetros ( $\tau^2$ ,  $\sigma^2$  e  $\phi$ ) da função de verossimilhança. Os modelos escolhidos foram os que apresentaram os maiores valores de maximização.

**Tabela 3.** Estimativas dos parâmetros utilizando-se estimadores de máxima verossimilhança.

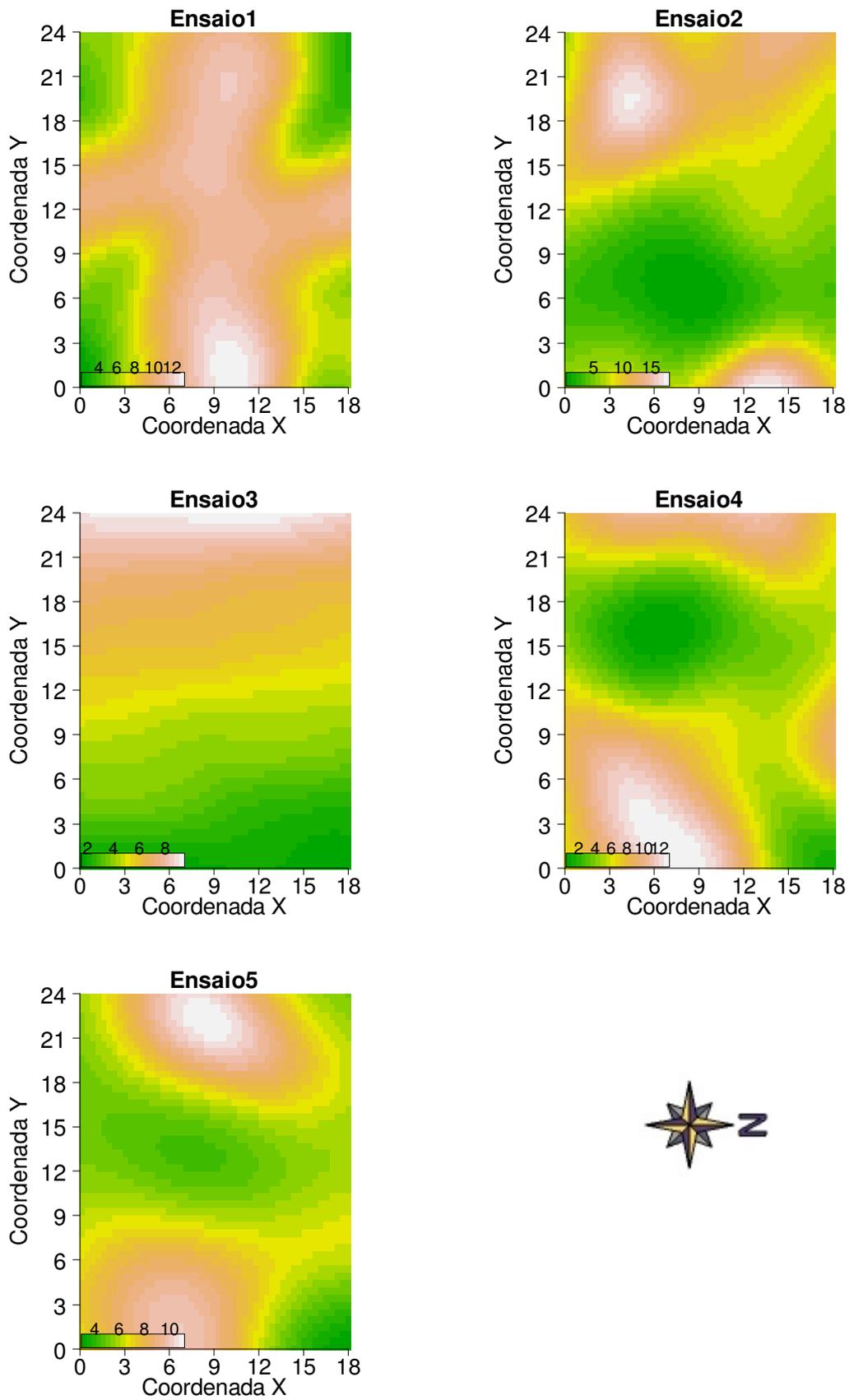
Ensaio	Modelo	$\lambda$	Parâmetros do semivariograma		
			$\tau^2$	$\sigma^2$	$\phi$
1	Gaussian	1,73	0,221	141,801	5,261
2	Gaussian	0,60	0,110	3,450	5,728
3	Matern	0,73	0,002	2,255	7,270
4	Gaussian	0,64	0,059	2,861	6,225
5	Gaussian	-0,08	0,002	0,079	7,673

$\lambda$  – é o expoente da transformação box-cox;  $\tau^2$  - é o efeito pepita dos dados transformados;  $\sigma^2$  - é a variância dos dados transformados;  $\phi$  – é o alcance, em m;

A dependência espacial entre os pontos teve um valor mínimo de 5,26 m, para o ensaio 1, confirmando que a distância entre coletores utilizada nos ensaios foi adequada.

### **Predição Espacial**

Para estimativa de valores de lâmina em locais não amostrados, foram gerados mapas de distribuição espacial (Figura 5), obtidos por interpolação por meio de krigagem, a partir dos parâmetros dos modelos ajustados aos semivariogramas.



**Figura 5** - Mapas de krigagem das lâminas coletadas, em mm.

Nos ensaios 3, 4 e 5 observa-se claramente os efeitos do vento nordeste na distribuição espacial da lâmina coletada, formando faixas de lâminas baixas (tons de verde) no centro da área para os ensaios 4 e 5, já no ensaio 3 observa-se uma divisão das lâminas em faixas, possivelmente devido a curta duração do ensaio (0,75 h). No ensaio 1, ocorreu uma concentração de lâminas maiores (tons de vermelho) no centro da área, local onde ocorre a sobreposição das lâminas, na ausência de vento. No ensaio 2, não foram medidas as condições climáticas.

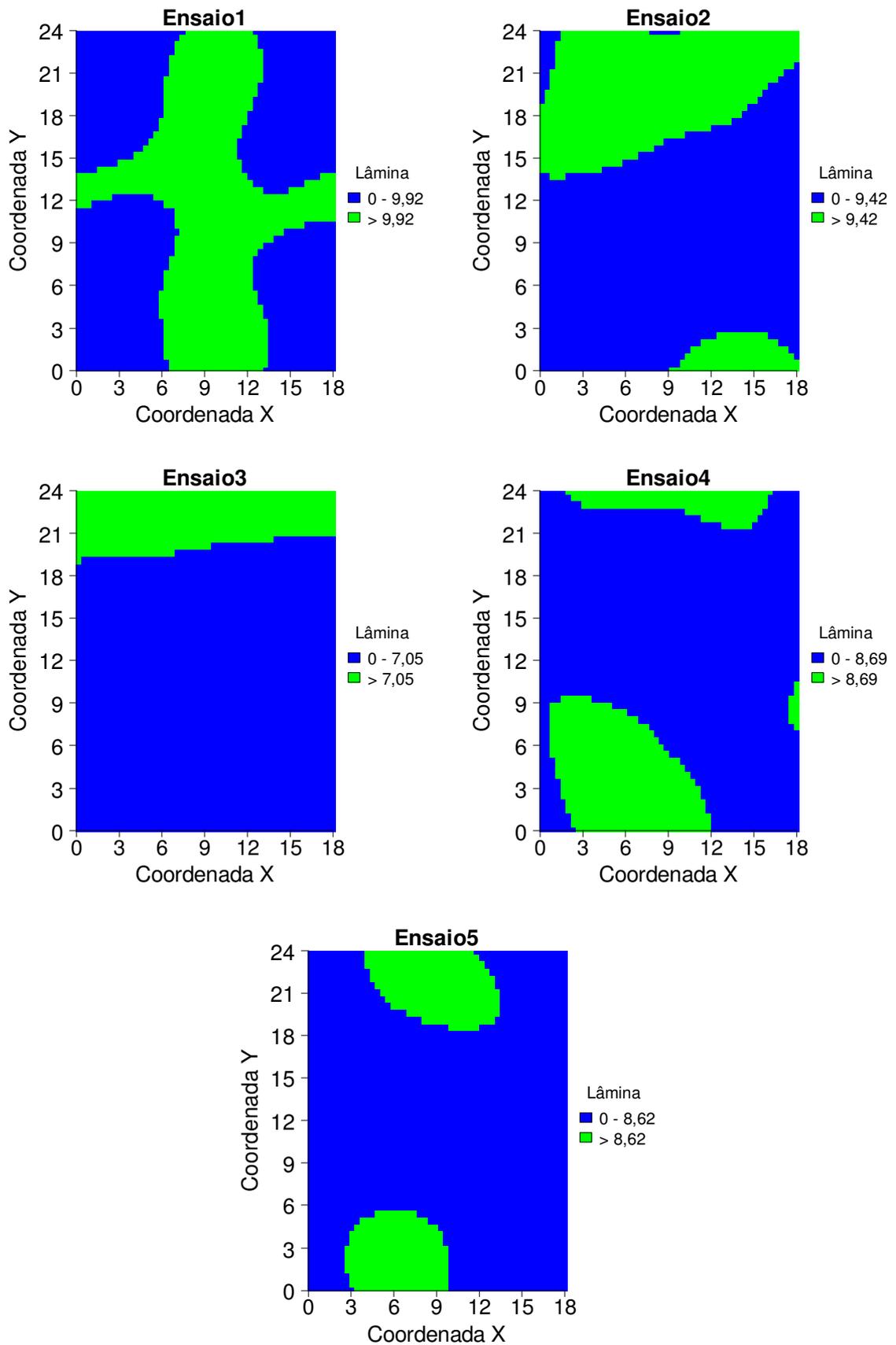
### Simulações condicionais e divisão das lâminas em classes

Na Tabela 4 e na Figura 6, observa-se que para todos os 5 ensaios, a maior parte da área recebeu menos que a lâmina média aplicada pelo aspersor, indicando que houveram perdas devido as condições climáticas.

**Tabela 4** - Porcentagem da área que recebeu mais ou menos que a lâmina aplicada média.

Ensaio	$\bar{L}_{apl}$ (mm)	área (%)	
		0 - $\bar{L}_{apl}$	> $\bar{L}_{apl}$
1	9,92	57,88	42,12
2	9,42	65,08	34,92
3	7,05	82,64	17,36
4	8,69	75,96	24,04
5	8,62	82,04	17,96

$\bar{L}_{apl}$  – lâmina aplicada média, em mm.



**Figura 6** – Simulação condicional da lâmina aplicada pelo aspersor, em mm. Em azuis lâminas menores que a lâmina média aplicada pelo aspersor, em verdes maiores.

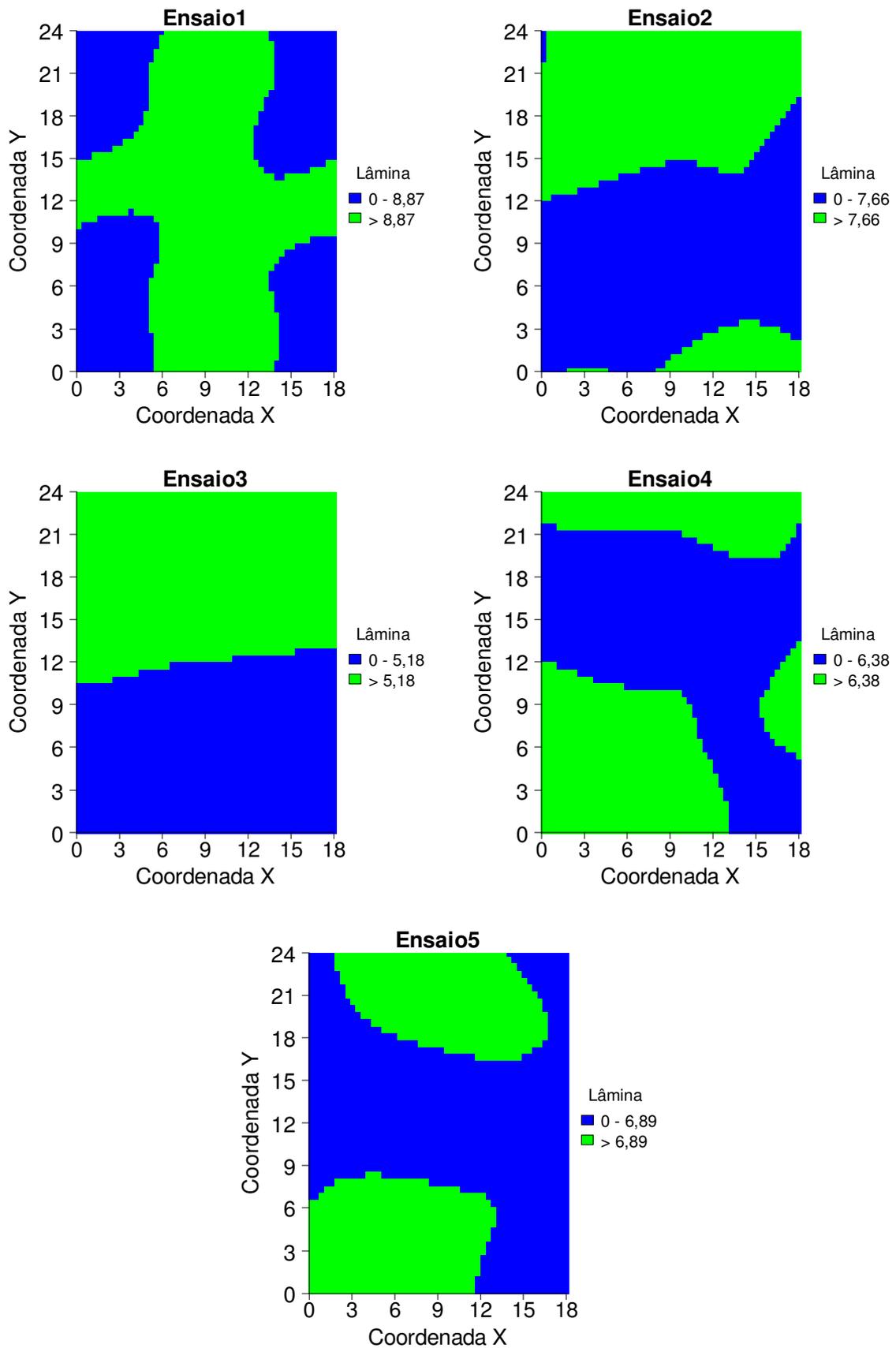
No ensaio 1, com condições climáticas que propiciam menores perdas por evaporação direta ( $T = 13,6 \text{ }^\circ\text{C}$  e  $UR = 68\%$ ) e menor arraste da água para regiões fora da área de ensaio ( $V_v = 0 \text{ m s}^{-1}$ ) a distribuição da lâmina aplicada pelo aspersor fica condicionada ao perfil de distribuição de água característico do aspersor, pressão de serviço e sobreposição de lâminas aplicadas pelos aspersores adjacentes, devido ao espaçamento adotado.

Na Tabela 5 e Figura 7, as áreas que receberam lâminas acima e abaixo da lâmina média coletada para os 5 ensaios, ficaram mais próximas de 50 %, já que as lâminas foram coletadas próximas ao nível do solo, descontando assim as perdas características da aspersão convencional.

**Tabela 5** - Porcentagem da área que recebeu mais ou menos que a lâmina média coletada.

Ensaio	$\bar{L}_{col}$ (mm)	área (%)	
		$0 - \bar{L}_{col}$	$> \bar{L}_{col}$
1	8,87	43,64	56,36
2	7,66	53,72	46,28
3	5,18	49,64	50,36
4	6,38	53,44	46,56
5	6,89	57,80	42,20

$\bar{L}_{col}$  – lâmina coletada média, em mm.



**Figura 7** – Simulação condicional da lâmina coletada, em mm. Em azul, lâminas menores que a lâmina coletada média, em verde lâminas maiores.

As porcentagens de áreas em relação a média, não tem a capacidade de relacionar, por exemplo, com níveis de estresse hídrico ou redução de produtividade devido a déficit ou excesso de lâmina. Na tabela 6, observa-se a porcentagem que recebeu determinada lâmina, com intervalo de 1 mm.

**Tabela 6** - Cálculo da porcentagem de áreas com intervalo de lâminas de 1mm.

Intervalo	Área para cada intervalo de lamina (%)				
	Ensaio1	Ensaio2	Ensaio3	Ensaio4	Ensaio5
0-1 mm	0	2,04	0	1,28	0
1-2 mm	0	5,56	1,48	5,4	0
2-3 mm	0,44	6,2	15,4	6,68	0
3-4 mm	2,12	7,72	11,6	8,4	1,12
4-5 mm	4,32	8,8	18,8	12	8,76
5-6 mm	7,8	7,04	16,2	15	25,44
6-7 mm	10,64	8,24	18,56	11,32	24,4
7-8 mm	9,28	11,32	8,72	9,88	15
8-9 mm	10,44	5,76	7,64	8,52	11,6
9-10 mm	14,16	5,76	1,6	7,64	9,56
10-11 mm	22,8	6,8	0	5,28	4,08
11-12 mm	14,24	7,72	0	4	0,04
12-13 mm	3,16	5,72	0	4,6	0
13-14 mm	0,6	4,08	0	0	0
14-15 mm	0	2,44	0	0	0
15-16 mm	0	2,48	0	0	0
16-17 mm	0	1,88	0	0	0
17-18 mm	0	0,44	0	0	0

Com os dados da Tabela 6, e conhecendo a lâmina adequada para a cultura, pode-se determinar a porcentagem da área adequadamente irrigada e porcentagens com déficit ou excesso de água.

### Mapas de probabilidade de ocorrência de lâminas menores que 6 mm

O objetivo destes mapas é dividir a área em regiões mais ou menos prováveis de receber uma lâmina arbitrária menor que 6 mm. Para gerar os mapas de probabilidades usa-se o conceito de frequência de ocorrência de um evento para estimar a sua chance de ocorrência. Desta forma, ao simular 1000 cenários diferentes, as lâminas menores que 6 mm, que aparecerem mais que 800 vezes, correspondem a probabilidade de ocorrência  $> 0,8$ . Na Figura 8 são apresentados os mapas para os 5 ensaios.

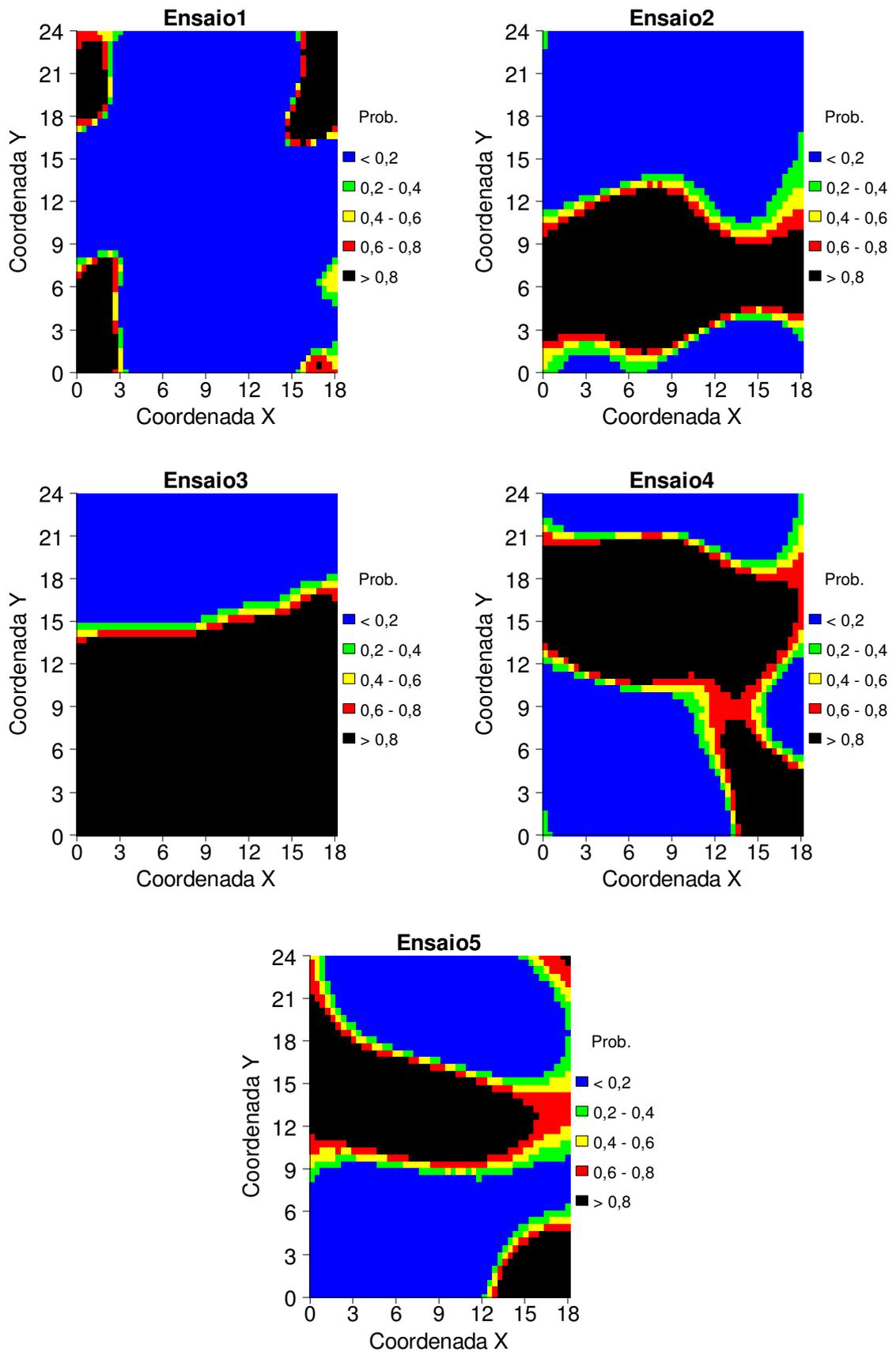


Figura 8 – Diferentes classes de probabilidade para lâmina menor que 6 mm. Na área em azul a probabilidade da lamina ser menor que 6 mm é  $< 20\%$ , já na área em preto é  $> 80\%$ .

## CONCLUSÕES

Apesar das diferentes condições climáticas, as lâminas coletadas nos 5 ensaios de uniformidade apresentaram dependência espacial, permitindo o uso de modelos geostatísticos. A partir dos modelos de correlação, foram construídos mapas de distribuição espacial de lâmina na área, através de krigagem. Com o uso de simulações condicionais é possível determinar lâminas em locais não amostrados com maior confiabilidade, que usando apenas um valor predito, como no caso da krigagem. Baseando-se nas simulações, a área foi dividida em classes de lâminas, e probabilidades de ocorrência de lâminas menores que um valor arbitrário de 6 mm. Determinando a porcentagem de área que recebe cada lâmina, pode-se relacionar com o tempo de irrigação necessário para que uma porcentagem da área total seja adequadamente irrigada.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS (obs:colocar no padrão da revista)

AZEVEDO, H. J.; BERNARDO, S.; RAMOS, M. M.; SEDIYAMA, G. C.; CECON, P. R. Influência de fatores climáticos e operacionais sobre a uniformidade de distribuição de água, em um sistema de irrigação por aspersão de alta pressão. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental.*, Campina Grande, v. 4, n. 2, p.152-158, 2000.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. *Manual de irrigação*. 8. ed. Viçosa: Editora UFV, 2008. 625 p.

Beskow, S.; Colombo, A.; Pereira, G. M.; Taveira, J. H. S.; Ricardo, C. M. Perdas de água por evaporação e arraste na irrigação por aspersão nas condições climáticas de LavrasMG, utilizando aspersores de tamanho médio. *Irriga*, v.13, p.113-127, 2008.

BIVAND, R.; ONO, H.; DULANP, R. *classInt: Choose univariate class intervals*. R package version 0.1-18, 2012. URL <http://CRAN.R-project.org/package=classInt>

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.

CHRISTIANSEN, J.E. Irrigation by sprinkling. Berkley: University of California, 1942. 124 p.

DIGGLE, P. J.; RIBEIRO JR, P. J. Model based geostatistics. New York: Springer, 2007. 230p.

HEINEMANN, A. B.; FRIZZONE, J. A.; PINTO, J. M.; J. C.; FEITOSA FILHO. Influência da altura do emissor na uniformidade de distribuição da água de um sistema pivo entral. Pesquisa. Agropecuária Brasileira., Brasília, v.33, n.9, p.1487-1491, set. 1998.

MARTINS, PAULO E. S.; ZANINI, JOSÉ R.; SILVA, ELCIDES R. da; LEMOS FILHO, MARCO A. F. Perfil radial e uniformidade de precipitação do aspensor NaanDanJain 427, em função da regulagem do defletor. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental., Campina Grande, v. 16, n. 1, p. 03-09, 2012.

NAKAMURA, R.; FERREIRA JUNIOR, R. A.; ZIMBACK, C. R. L. Geoestatística aplicada a lâminas de irrigação em diferentes espaçamentos entre aspersores. II Simpósio de Geoestatística Aplicada em Ciências Agrárias. Botucatu, 2011. 5p.

PAULINO, J.; FOLEGATTI, M. V.; ZOLIN, C. A.; ROMÁN, R. M. S.; 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, 2011.

R DEVELOPMENT CORE TEAM R. A language and environment for statistical computing. Vienna, R Foundation for Statistical Computing, 2012. URL <http://www.R-project.org>

RESENDE, R.; FRIZZONE, J. A.; GONÇALVES, A. C. A.; FREITAS, P. S. L. Influência do espaçamento entre aspersores na uniformidade de distribuição de água acima e abaixo da superfície do solo. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental., Campina Grande, v. 2, n. 3, p. 257-261, 1998.

RIBEIRO JR., P. J.; DIGGLE, P. J. geOR: a package for geostatistical analysis. R.News, v.1, n.2, p.15-18, 2001.