

UNIFORMIDADE DE APLICAÇÃO DE ÁGUA PELO ASPERSOR PLONA-RL250 EM SISTEMAS ESTACIONÁRIOS DE IRRIGAÇÃO

Giuliani do Prado¹; Alberto Colombo¹; Antônio Carlos Barreto²; Flávio Gomes de Matos³; Jerônimo Jonas Ferreira Júnior³

¹*Departamento do Engenharia, Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, giulianip@bol.com.br*

²*Centro Federal de Educação Tecnológica, Uberaba, MG*

³*Universidade Federal do Tocantins, Gurupí, TO.*

1 RESUMO

Resultados de quarenta ensaios de distribuição de água do aspersor canhão PLONA-RL250, correspondentes a 8 bocais e 5 pressões de serviço, foram submetidos à análise de agrupamento, permitindo a identificação de quatro formas geométricas típicas (I, II, III ou IV) de ocorrência do perfil radial adimensional de distribuição de água desse aspersor, operando sob ventos fracos. Com base em simulações digitais, foram estabelecidas, para cada uma das formas geométricas típicas, superfícies de resposta da uniformidade de aplicação de água (CUC) de sistemas estacionários de irrigação, em função da disposição (retangular e triangular) e do espaçamento entre aspersores. A inclusão, nas superfícies de resposta da uniformidade, de linhas delimitadoras, das combinações de espaçamento que resultam em recobrimento completo da área irrigada e das combinações de espaçamento que resultam no valor desejado da taxa de aplicação de água, mostrou-se bastante útil ao processo de seleção das combinações de espaçamento. Apesar de algumas semelhanças entre os resultados obtidos neste estudo com resultados de estudos anteriores conduzidos por Christiansen (perfis II e III com o perfil D e perfil IV com perfil E), conclui-se que as recomendações de espaçamento devem ser condicionadas ao prévio conhecimento das características de distribuição de água do aspersor.

UNITERMOS: simulações digitais, análise de agrupamento, espaçamento de aspersores.

PRADO, G. do; COLOMBO, A.; BARRETO, A. C.; MATOS, F. G. de; FERREIRA JÚNIOR, J. J. WATER APPLICATION UNIFORMITY OF THE PLONA-RL250 SPRINKLER IN STATIONARY SPRINKLER SYSTEMS

2 ABSTRACT

Data collected from forty water distribution tests of the PLONA-RL250 raingun sprinkler, corresponding to different combinations of eight nozzle sizes and five working pressures, were submitted to clustering analysis, allowing the identification of four typical geometric shapes (I, II, III and IV) of the dimensionless water application profile of this sprinkler operating under low wind condition. Based on digital simulations, for each typical geometric shape, uniformity (CUC) response surfaces, as function of sprinkler disposition (rectangular and triangular) and spacing, were established. Sprinkler spacing selection process was further improved by including two additional lines on the uniformity response surface. One line had spacing combinations that resulted in full coverage of the irrigated area and the other had spacing alternatives that resulted in application rates smaller than the design

infiltration rate. Besides some similarities found among results from this study and results from studies based on Christiansen's geometrical sprinkler application rate profiles (profiles II and III with E profile and profile IV with the D profile), water distribution simulations results have indicated that sprinkler spacing recommendations must be based on the previous knowledge of the sprinkler water distribution profile characteristics.

KEY WORDS: digital simulation, clustering, sprinkles spacing

3 INTRODUÇÃO

Sob o ponto da distribuição espacial da água aplicada, os sistemas de irrigação são avaliados pela sua uniformidade de aplicação de água que é, normalmente, quantificada por um coeficiente estatístico. É uma prática comum, na literatura especializada, atribuir um valor mínimo aceitável para o coeficiente de uniformidade dos diferentes sistemas de irrigação. Esses valores mínimos de uniformidade devem ser interpretados pelos projetistas como padrões de uniformidade, que podem ser facilmente excedidos pelos sistemas de irrigação considerados, mas não devem ser confundidos como metas a serem atingidas. Segundo Frizzone & Dourado Neto (2003), a uniformidade de aplicação de água deve ser entendida como um elemento decisório, principalmente nos processos de planejamento e operação dos sistemas de irrigação, sendo que esse elemento afeta a sustentabilidade e o nível de produtividade da área irrigada, com efeitos diretos sobre a sua rentabilidade.

A desuniformidade na aplicação de água faz com que uma parcela da área irrigada receba um excesso de água, enquanto o restante da área é subirrigada. Desta forma, para assegurar que toda a área receba a lâmina de irrigação desejada, evitando-se o impacto negativo da subirrigação na produtividade da cultura, aplica-se água em excesso que, por sua vez, acarreta em desperdício de água, energia e nutrientes (Clemmens, 1991).

Os sistemas estacionários de irrigação por aspersão abrangem os sistemas nos quais não ocorre deslocamento dos aspersores no campo durante o período de aplicação de água (Keller & Bliesner, 1990; Tarjuelo, 1999). Nesses sistemas, a uniformidade de aplicação de água é influenciada por diversos fatores que podem ser, ou não, controlados pelo operador do sistema. Dentre os fatores controlados pelo operador, destacam-se: i) a forma geométrica do perfil radial de distribuição de água do aspersor, que é determinada pelo tipo do aspersor selecionado, pela combinação de bocais e pressão de serviço e pelo seu ângulo de lançamento do jato d'água; ii) o espaçamento entre aspersores; iii) a disposição dos aspersores no campo (Keller & Bliesner, 1990; Li, 1996; Bernardo et al., 2005). Dentre os fatores que fogem ao controle do operador, destacam-se: iv) velocidade e; v) direção do vento em relação à disposição dos aspersores (Seginer et al., 1992; Carrión et al., 2001).

Devido às inúmeras possibilidades de interação entre os fatores que afetam a distribuição de água nos sistemas estacionários de irrigação por aspersão, a análise da uniformidade de aplicação de água em campo torna-se uma tarefa trabalhosa. Essa análise pode ser agilizada através do uso de simulações em computador. No entanto, os aplicativos computacionais requerem o conhecimento das características de distribuição de água dos aspersores trabalhando em diversas condições operacionais.

Simulações da uniformidade de aplicação de água em sistemas estacionários de aspersão, operando sob diferentes combinações de pressão de serviço, diâmetro do bocal e espaçamento entre aspersores, que foram geradas a partir de perfis radiais de distribuição de água, são apresentadas por César et al. (2004) e Soccol et al. (2004). As recomendações de

espaçamento entre aspersores apresentadas nesses trabalhos podem ser generalizadas para outros modelos de aspersores, quando a forma geométrica assumida pelo perfil radial de distribuição de água e a razão entre os espaçamentos entre aspersores e o diâmetro molhado do aspersor são devidamente consideradas.

Em seu trabalho pioneiro, Christiansen (1942) apresenta recomendações de espaçamento entre aspersores expressas em frações do diâmetro molhado do aspersor para seis diferentes formas geométricas típicas, assumidas pelo perfil radial de distribuição de água dos aspersores (perfis A, B, C, D, E e F). Para arranjos retangulares e triangulares de aspersores operando em sistemas estacionários de irrigação, Chen & Wallender (1984) apresentam superfícies de resposta dos valores de uniformidade de aplicação de água, em função do espaçamento entre aspersores, considerando os seis diferentes formatos geométricos típicos de Christiansen. Essas superfícies de respostas facilitam a determinação das melhores disposições entre aspersores nos sistemas estacionários de irrigação.

De acordo com Martín-Benito et al. (1992), as três formas geométricas mais frequentes dos perfis radiais de distribuição de água dos aspersores, de tamanho médio, são: a) elíptica, obtida quando se trabalha com apenas um bocal; b) “donut”, obtida quando o aspersor opera sob pressões de serviço muito baixas e; c) triangular, obtida quando se trabalha com aspersores com dois bocais. Pereira (1995) comparou a uniformidade de aplicação de água de sistemas estacionários, operando com aspersores de perfis radiais tipo triangular, “donut” e elíptico, concluindo que, na maioria das situações, o perfil triangular proporciona os melhores resultados, enquanto o perfil “donut” proporciona os piores valores de uniformidade.

Em razão das dificuldades de se efetuar os ensaios de caracterização do perfil radial de distribuição de água dos diferentes modelos de aspersores, operando sob diferentes combinações de bocal, pressão de serviço e ângulo de jato, esses dados nem sempre são disponibilizadas pelas empresas fabricantes de aspersores (Prado & Colombo, 2005). Normalmente, os fabricantes limitam-se a apresentar os valores de vazão e raio de alcance, para as diferentes combinações de bocal e pressão de serviço recomendadas para o aspersor, deixando aos projetistas e usuários a responsabilidade de selecionar as disposições entre aspersores que resultam em valores adequados de uniformidade de aplicação de água.

Diante deste quadro, e visando aprimorar os critérios pelos quais projetistas e irrigantes selecionam as condições operacionais mais adequadas para o uso de aspersores do tipo canhão hidráulico, em sistemas estacionários de irrigação, apresenta-se, neste trabalho, valores de uniformidade de aplicação de água do aspersor PLONA-RL250, que foram obtidos em simulações realizadas a partir das características do perfil radial de distribuição de água desse aspersor sob diferentes condições operacionais.

4 MATERIAL E MÉTODOS

O aspersor da marca PLONA, modelo RL250, utilizado neste estudo, é um canhão hidráulico de reversão lenta, com um ângulo de lançamento do jato de água de 24°, flange de acoplamento de 2 ½” e giro proporcionado pelo impacto de um de seus dois braços oscilantes. Esse aspersor apresenta dois bocais cônicos, um principal, de latão, disponível em oito diâmetros distintos (14, 16, 18, 20, 22, 24, 26 e 28 mm), e um bocal auxiliar, de plástico, com 6 mm de diâmetro.

O trabalho foi realizado a partir dos resultados de 40 ensaios de distribuição de água desse aspersor que abrangeram as possíveis combinações entre os oito diâmetros de bocais disponíveis e cinco pressões de serviço (294, 392, 490, 580 e 686 kPa) recomendadas pelo

fabricante. Os ensaios foram realizados segundo metodologia detalhada por Prado & Colombo (2005), no Laboratório de Hidráulica do Departamento de Engenharia da Universidade Federal de Lavras, em Lavras/MG.

De acordo com a metodologia adotada, os valores de vazão e raio de alcance, observados durante os ensaios, foram utilizados para determinar, através do método dos mínimos quadrados, os valores dos coeficientes das equações que relacionam esses parâmetros aos valores do diâmetro do bocal principal e da pressão de serviço do aspersor.

Posteriormente, os 40 perfis radiais de aplicação de água, determinados nos ensaios, foram reduzidos a 40 conjuntos contendo, cada um, 20 pares de valores adimensionais de distância ao aspersor e intensidade de precipitação. Os vinte valores de distância adimensional representam vinte frações do raio de alcance do aspersor, variando deste 0,025 até 0,975, em intervalos regulares de 0,05 (0,025, 0,075, 0,125,...,0,975). Os valores de intensidade adimensional correspondem a razão entre a intensidade de precipitação no ponto considerado, em mm h^{-1} , e a intensidade média de aplicação do aspersor (i_m em mm h^{-1}), que foi computada, em função da vazão (Q em $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$) e do raio de alcance (R em m), pela seguinte equação:

$$i_m = \left(\frac{Q}{\pi \cdot R^2} \right) \cdot 1000 \quad (1)$$

Os 40 conjuntos, com vinte pares adimensionais de distância e intensidade de precipitação, foram submetidos à análise de agrupamento, visando: i) identificar o menor número de formas geométricas típicas que podem representar os 40 conjuntos obtidos; ii) caracterizar o conjunto de vinte valores adimensionais de intensidade de aplicação de água que melhor representa cada forma geométrica típica; e iii) identificar a forma geométrica típica que melhor representa o perfil radial adimensional correspondente a cada uma das 40 combinações de bocal e pressão de serviço.

Foi desenvolvido um aplicativo computacional, em *Visual Basic* da planilha eletrônica do *Excel 98*, que simula a uniformidade de aplicação de água do aspersor PLONA-RL250 operando em sistemas estacionários de irrigação. O aplicativo foi desenvolvido para selecionar, dentre as formas típicas identificadas pela análise de agrupamento, a forma geométrica mais adequada para representar o perfil radial adimensional de distribuição de água do aspersor PLONA-RL250 operando, de forma estacionária, sob uma das quarenta possíveis combinações de diâmetro de bocal e pressão de serviço. O perfil radial de distribuição de água selecionado é transformado para a sua forma dimensional e, em seguida, é revolucionado sobre seu próprio eixo, gerando, para o tempo de irrigação desejado, a matriz que contém valores de lâminas aplicadas em coletores fictícios, dispostos em uma malha com espaçamento regular de 3m em torno do aspersor.

Para arranjos retangulares e triangulares dos aspersores no campo (Figura 1), as lâminas das matrizes representativas da aplicação de água ao redor dos aspersores são sobrepostas, permitindo a simulação da uniformidade de aplicação de água em diferentes espaçamentos de aspersores, todos múltiplos de 6m e compreendidos no intervalo entre 40 e 100% do diâmetro molhado do aspersor (DM em m).

Os valores simulados de uniformidade de aplicação de água, expressos pelo coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC em %), foram agrupados em diferentes superfícies de respostas, cada uma das quais representando uma das formas típicas do perfil radial identificadas pela análise de agrupamento. Essas superfícies de respostas apresentam a distribuição das isolinhas de CUC em um sistema de eixos cartesianos que representam os

valores de espaçamento entre aspersores, na linha lateral (Sl em m) e na linha principal (Sp em m), expressos como fração do diâmetro molhado do aspersor.

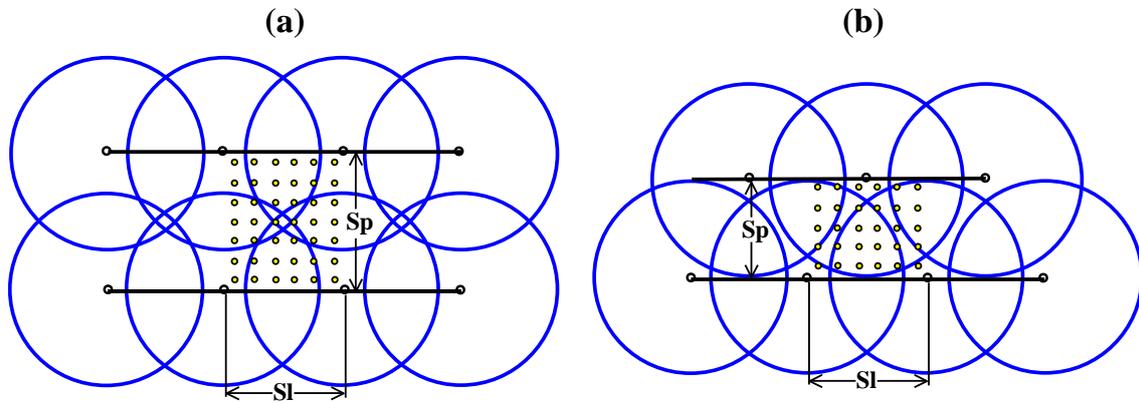


Figura 1. Espaçamento entre aspersores na linha lateral (Sl) e na linha principal (Sp) para arranjos retangulares (a) e triangulares (b).

Em todas as superfícies de resposta desenvolvidas, foi traçada a curva que delimita as combinações de espaçamento entre aspersores, a partir das quais a sobreposição das áreas molhadas pelos aspersores é incompleta. As combinações de espaçamentos entre aspersores a partir das quais se inicia o comprometimento da cobertura completa da área irrigada foram determinadas, respectivamente, para arranjos retangulares e triangulares, através das seguintes expressões:

$$\frac{Sl}{DM} = \sqrt{1 - \left(\frac{Sp}{DM}\right)^2} \quad (2)$$

$$\frac{Sl}{DM} = \sqrt{1 - 4 \cdot \left(\frac{Sp}{DM} - 0,5\right)^2} \quad (3)$$

O procedimento utilizado para plotar as isolinhas de uniformidade de aplicação de água permite identificar, segundo metodologia de Chen & Wallender (1984), as combinações de espaçamentos que não promovem escoamento superficial, ou seja, as combinações nas quais o valor de intensidade de aplicação de água (i em mm h^{-1}), que é calculada pela expressão 4, não excede a velocidade de infiltração básica do solo.

$$i = \left(\frac{Q}{Sl \cdot Sp}\right) \cdot 1000 \quad (4)$$

A identificação das combinações de espaçamentos entre aspersores que não excedem o valor máximo desejado da intensidade de aplicação de água é feita com o auxílio da vazão adimensional (Qa), proposta por Chen & Wallender (1984):

$$Q_a = \left(\frac{Q}{\text{VIB} \cdot \text{DM}^2} \right) \cdot 1000 \quad (5)$$

em que, VIB é a velocidade de infiltração básica do solo (mm h^{-1}).

No sistema cartesiano utilizado para apresentação das isolinhas de uniformidade de aplicação de água, as combinações de espaçamentos entre aspersores, que resultam em um dado valor de vazão adimensional, Q_a , podem ser identificadas através das curvas mostradas na Figura 2 ou, através da expressão desenvolvida por Chen & Wallender (1984):

$$\frac{S_l}{\text{DM}} = Q_a \cdot \left(\frac{\text{DM}}{S_p} \right) \quad (6)$$

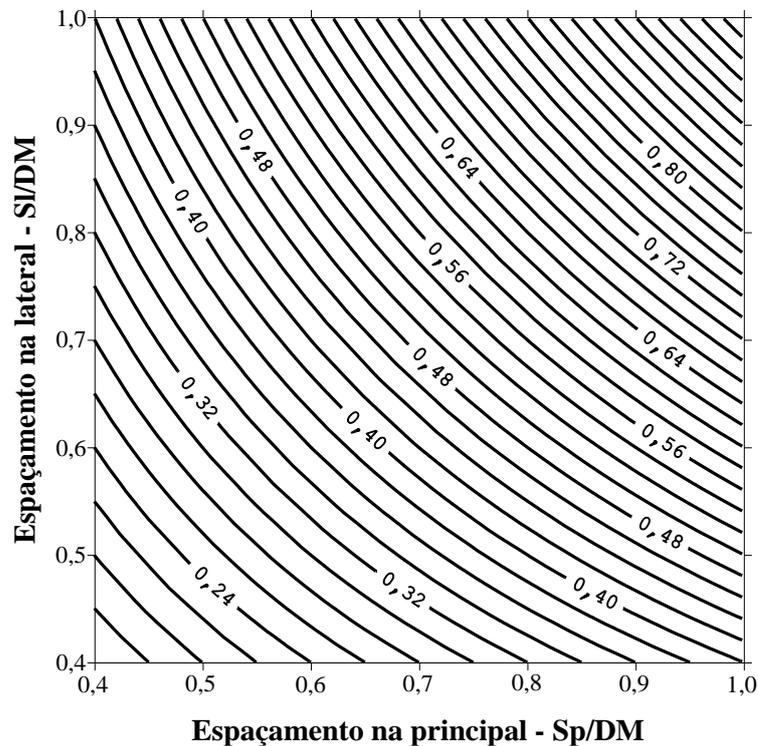


Figura 2. Vazão adimensional (Q_a) em função de diferentes combinações de espaçamentos entre aspersores, expressos em termos de fração do diâmetro molhado do aspersor.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores ajustados dos coeficientes das equações que fornecem estimativas dos valores de vazão (Q em $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$) e de raio de alcance (R em m) do aspersor PLONA-RL250, são apresentados nas expressões 7 e 8.

$$Q = 0,008464 \cdot b^{1,7613} \cdot p^{0,4937} \quad (r^2 = 0,9991) \quad (7)$$

$$R = -0,00006p^2 + 0,0561p + 0,0023p \cdot b - 0,0663b^2 + 2,5858b - 15,0104 \quad (r^2 = 0,9996) \quad (8)$$

em que, b é o diâmetro do bocal principal (mm); p a pressão de serviço do aspersor (kPa).

Os resultados da análise de agrupamento são mostrados nas Tabelas 1 e 2. Verifica-se na Tabela 1 que os perfis adimensionais de aplicação de água do aspersor PLONA-RL250 podem assumir quatro formas geométricas distintas (I, II, III e IV). A forma geométrica típica que melhor representa o perfil radial adimensional correspondente a cada uma das 40 combinações de bocal e pressão de serviço é, também, mostrada na Tabela 1.

Tabela 1. Formas geométricas (I, II, III ou IV) assumidas pelo perfil radial de distribuição de água do aspersor PLONA-RL250, em função de diferentes condições operacionais.

Pressão (kPa e m.c.a)	Diâmetro dos Bocais (mm)							
	14 x 6	16 x 6	18 x 6	20 x 6	22 x 6	24 x 6	26 x 6	28 x 6
294 (30)	II	I	I	I	I	I	I	I
392 (40)	II	II	II	I	I	I	I	I
490 (50)	IV	IV	II	II	III	I	I	III
588 (60)	IV	IV	IV	III	III	III	I	III
686 (70)	IV	IV	IV	IV	III	III	III	III

Os vinte pares de valores adimensionais de distância ao aspersor (ra) e intensidade de precipitação (ia), correspondentes às quatro formas geométricas típicas assumidas pelo perfil radial de distribuição de água do aspersor PLONA-RL250, são apresentados na Tabela 2. Nessa tabela, também foi incluído o par ($ra = 1,000$, $ia = 0,000$).

Tabela 2. Pares adimensionais de distância ao aspersor ($ra =$ fração do raio molhado) e intensidade de precipitação ($ia =$ fração da média) das formas geométricas I, II, III e IV do perfil radial de distribuição de água do aspersor PLONA-RL250.

Distância ra (-)	Intensidade de precipitação $-ia$ (-)			
	Perfil tipo I	Perfil tipo II	Perfil tipo III	Perfil tipo IV
0,025	0,224	0,483	0,453	0,501
0,075	0,646	1,369	0,721	1,260
0,125	0,445	0,746	0,652	0,899
0,175	0,480	0,720	0,834	0,942
0,225	0,621	0,837	1,050	1,272
0,275	0,774	1,014	1,148	1,331
0,325	0,880	1,214	1,093	1,457
0,375	0,923	1,309	0,976	1,455
0,425	0,937	1,290	0,956	1,372
0,475	0,931	1,206	1,015	1,237
0,525	0,926	1,061	1,044	1,144
0,575	0,921	1,004	1,044	1,084
0,625	0,940	0,973	1,086	1,078
0,675	0,995	0,999	1,1151	1,109
0,725	1,065	1,059	1,209	1,117
0,775	1,125	1,088	1,232	1,122
0,825	1,257	1,129	1,214	1,090
0,875	1,423	1,174	1,198	0,975
0,925	1,521	1,003	0,921	0,640
0,975	0,444	0,312	0,221	0,155
1,000	0,000	0,000	0,000	0,000

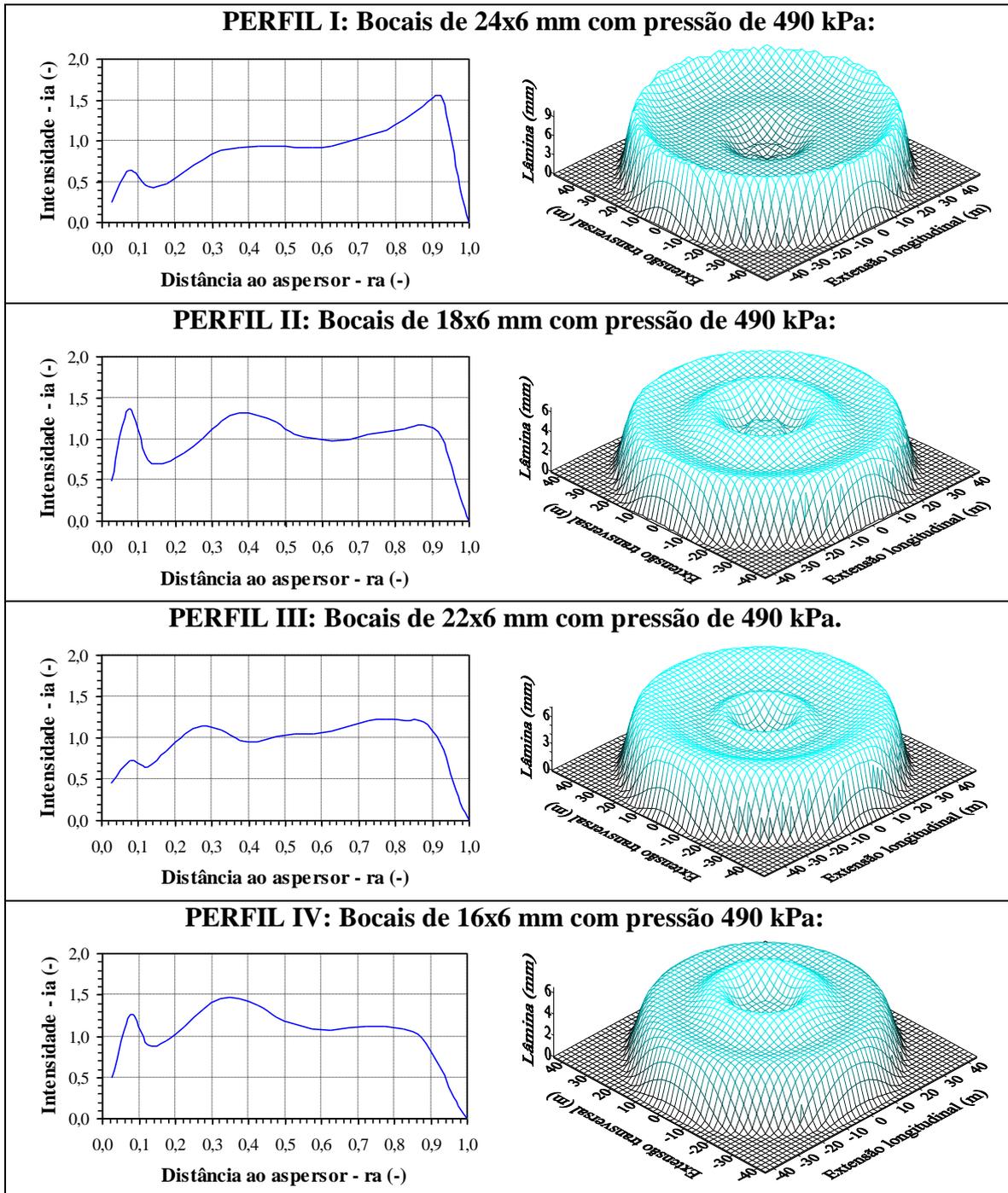


Figura 3. Formas geométricas típicas (I, II, III e IV) do perfil radial adimensional e lâminas geradas pela revolução do perfil radial do PLONA-RL250 operando, por um período de uma hora, sob diferentes combinações de bocais, na pressão de serviço de 490kPa.

Na coluna esquerda da Figura 3, são apresentadas as curvas representativas das quatro formas geométricas típicas assumidas pelos perfis radiais adimensionais de distribuição de água do aspersor PLONA-RL250. Na coluna direita dessa figura, são apresentadas as matrizes que contêm as lâminas aplicadas em coletores fictícios dispostos em torno do aspersor. Os valores de lâmina apresentados foram gerados pelo aplicativo desenvolvido considerando um

tempo de irrigação de 1 hora e valores de vazão e raio de alcance dados, respectivamente, pelas equações 7 e 8.

O posicionamento da zona de ocorrência dos perfis I, II, III e IV, na Tabela 1, pode ser interpretada como uma indicação de que as diferentes formas geométricas refletem diferentes níveis de pulverização do jato de água, que são determinadas pelas condições operacionais do aspersor. Observa-se que a ocorrência do perfil I é limitada ao canto direito superior da Tabela 1, em que os menores valores de pressão são combinados com os maiores diâmetros de bocais, contrastando com a posição da zona de ocorrência do perfil IV, que se limita ao canto inferior esquerdo da Tabela 1, em que os maiores valores de pressão são combinados com os menores diâmetros de bocais. Entre essas duas regiões extremas da Tabela 1, estendem-se, de forma gradual, as regiões de ocorrência dos perfis do tipo II e III.

A intensificação do grau de pulverização do jato de água do aspersor, à medida em que o perfil radial de distribuição de água muda do formato I para o formato IV, é também observada na coluna da esquerda da Figura 3. Nota-se, nessa coluna, um acúmulo de aplicação de água na extremidade final do perfil radial do tipo I, que se dissipa na medida em que o perfil assume os formatos II, III e IV. Segundo Bernardo et al. (2005), a dissipação desse acúmulo de aplicação de água na extremidade do raio de alcance é indicativa de aumento no grau de pulverização do jato de água do aspersor.

Valores simulados do coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC em %), para sistemas estacionários de irrigação por aspersão, operando, na ausência de vento, com o aspersor PLONA-RL250 em disposição retangular, sob diferentes espaçamentos entre aspersores, expressos em termos do diâmetro molhado do aspersor, são mostrados na Figura 4.

A exatidão da rotina de sobreposição das lâminas, do aplicativo computacional desenvolvido, pode ser inferida pela simetria dos valores apresentados, em torno da linha diagonal imaginária que determina a disposição quadrada ($S_I = S_p$) na Figura 4. A exatidão dos cálculos pode, também, ser inferida através das semelhanças entre a distribuição das isolinhas de uniformidade correspondentes aos perfis D e E de Christiansen (1942), que são apresentadas na Figura 2 do trabalho de Chen & Wallender (1984), com a distribuições das isolinhas correspondentes, respectivamente, aos perfis II e III e ao perfil IV.

A semelhança encontrada entre a distribuição das isolinhas de uniformidade dos perfis II e III com a distribuição das isolinhas do perfil E de Christiansen, apresentada por Chen & Wallender (1984), pode ser justificada em função das semelhanças geométricas entre os formatos dos perfis radiais adimensionais II e III (Figura 3) e o formato do perfil radial E de Christiansen. Da mesma forma, as semelhanças geométricas entre os formatos dos perfis adimensionais IV e D justificam a semelhança encontrada entre a distribuição das isolinhas de uniformidade desses dois perfis. Por outro lado, em função da ausência de semelhança entre os resultados obtidos com o perfil tipo I e os resultados mostrados em Chen & Wallender (1984), para o perfil E de Christiansen (1942), pode-se concluir que o excesso de aplicação de água na extremidade do perfil I excede aquele assumido por Chen & Wallender (1984), para quantificar o perfil radial de distribuição de água do tipo E de Christiansen (1942).

Os resultados obtidos com o canhão PLONA-RL250, nas condições operacionais que resultam em perfis do tipo II, III e IV, confirmam as observações de Keller & Bliesner (1990), e de Tarjuelo (1999), no sentido de que aspersores do tipo canhão hidráulico tendem a apresentar um perfil radial com formato geométrico semelhante ao dos perfis D e E. Por outro lado, a particularidade da distribuição das isolinhas do perfil tipo I enfatiza a necessidade de condicionar as recomendações de espaçamento entre aspersores ao prévio conhecimento das características de perfil radial de distribuição de água. As combinações de espaçamentos $S_I =$

0,4DM e $0,7DM < Sp < 0,8DM$, que são recomendadas na Figura 5.8 de Keller & Bliesner (1990) para os perfis E e D de Christiansen, são adequadas para as combinações de bocais que resultam nos perfis dos tipos II, III e IV, mas, no entanto, são inadequadas para as combinações de bocais que resultam no perfil do tipo I.

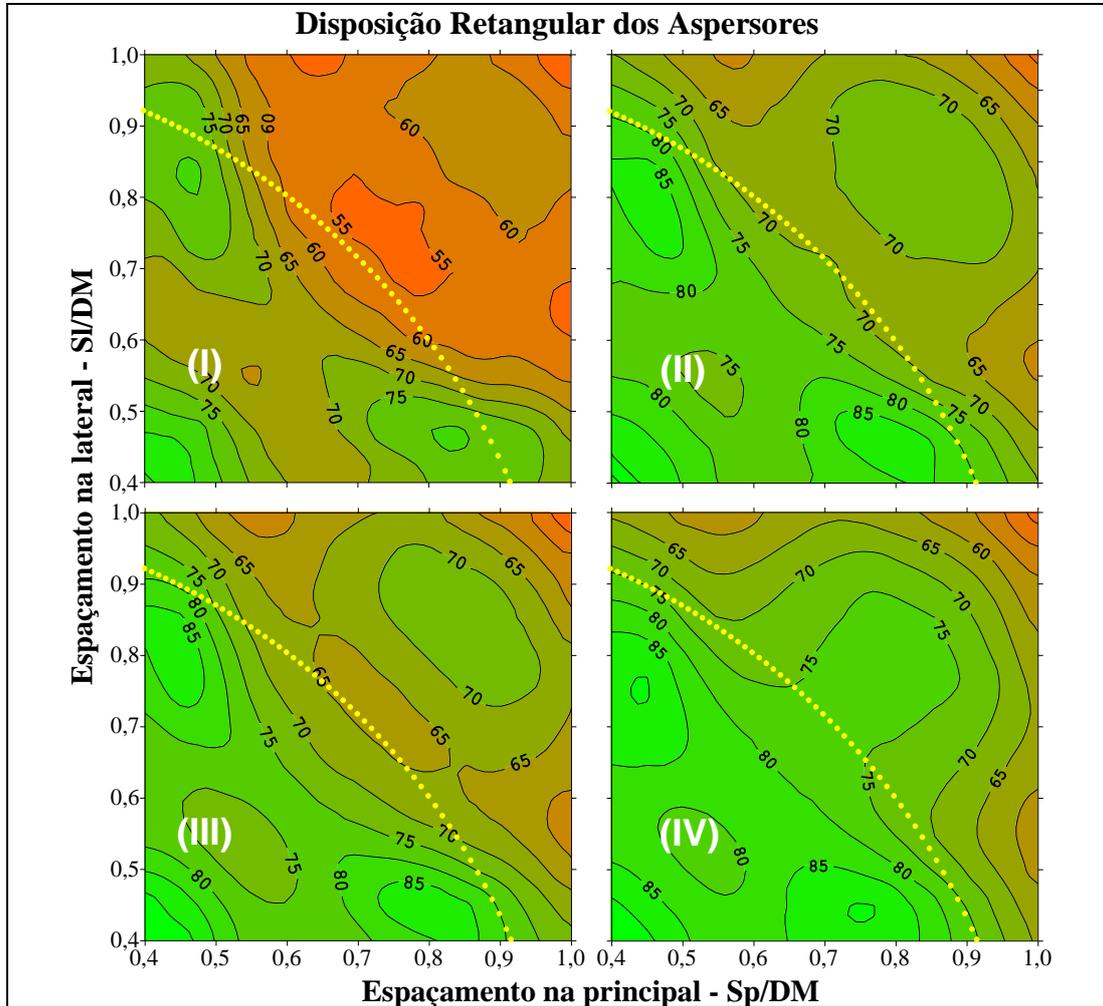


Figura 4. Coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC), sob diferentes combinações de espaçamento entre aspersores em arranjo retangular, para as quatro formas geométricas (I, II, III e IV) assumidas pelo perfil adimensional do aspersor PLONA-RL250. Valores abaixo à linha pontilhada garantem um mínimo de sobreposição.

Especificamente para o caso do aspersor canhão PLONA-RL250, operando em sistemas estacionários de aspersão com disposição retangular entre aspersores, em condições de ventos fracos, os resultados apresentados na Figura 4 indicam que: (i) as combinações de bocais e pressão de serviço, mostradas na Tabela 1, que resultam no perfil do tipo I, devem ser evitadas, exceto em combinações de espaçamentos menores que 40% do diâmetro molhado; (ii) as combinações de bocais e pressão de serviço que resultam nos perfis II e III requerem combinações de espaçamentos menores que 50% do DM, ou disposições retangulares com $0,4DM < S_l < 0,5DM$ e $0,7DM < S_p < 0,9DM$; (iii) as combinações de bocais e pressão de serviço que resultam no perfil IV requerem combinações de espaçamentos menores que 65% do DM, ou disposições retangulares com $0,4DM < S_l < 0,5DM$ e $0,6DM < S_p < 0,85DM$.

Superfícies de resposta (CUC em %), para sistemas estacionários de irrigação por aspersão, operando, na ausência de vento, com o aspersor PLONA-RL250 em disposição triangular, sob diferentes espaçamentos entre aspersores, expressos em termos do diâmetro molhado do aspersor, são mostradas na Figura 5.

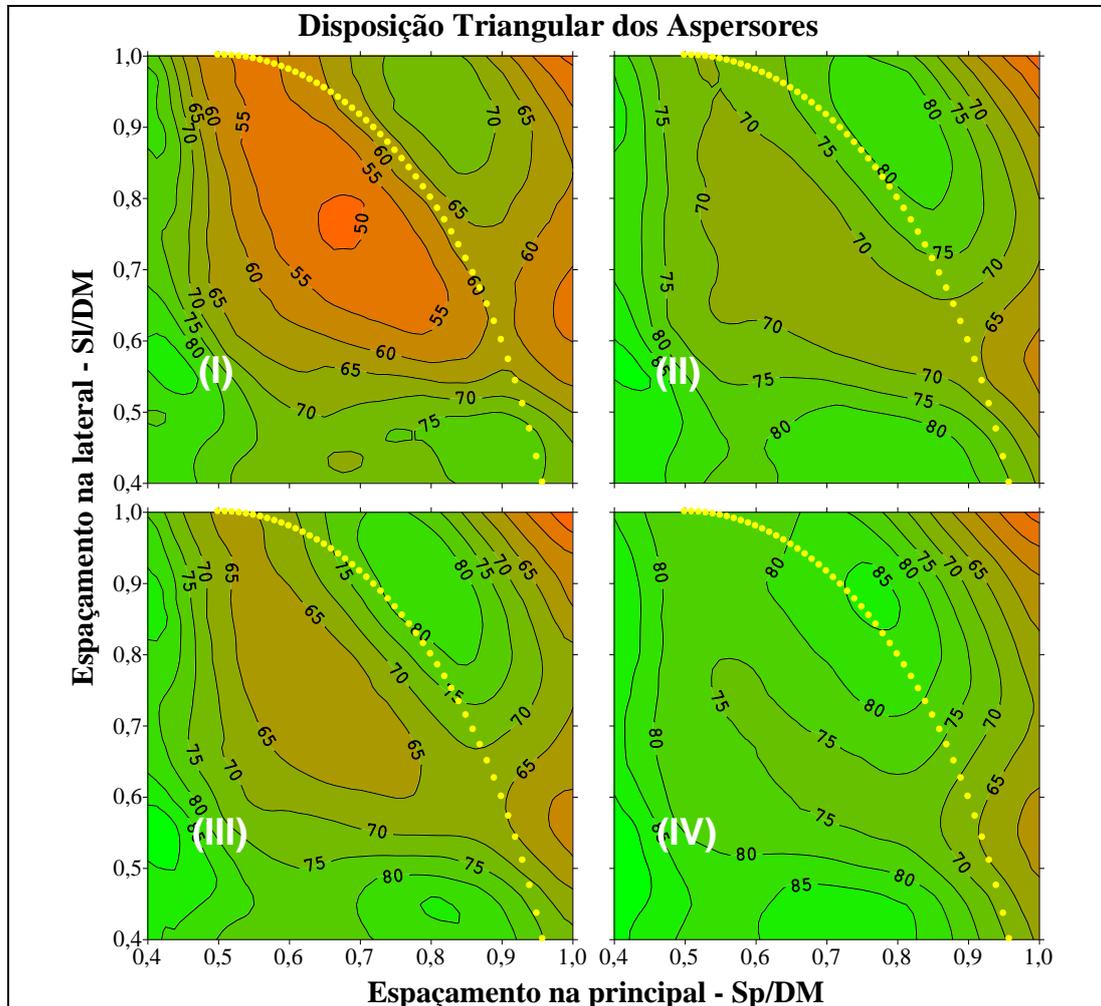


Figura 5. Coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC), sob diferentes combinações de espaçamento entre aspersores em arranjo triangular, para as quatro formas geométricas (I, II, III e IV) assumidas pelo perfil adimensional do aspersor PLONA-RL250. Valores abaixo a linha pontilhada garantem um mínimo de sobreposição.

A exatidão da rotina de sobreposição das lâminas, do aplicativo computacional desenvolvido, pode ser inferida através das semelhanças entre a distribuição das isolinhas de uniformidade correspondentes aos perfis D e E de Christiansen (1942), que são apresentadas na Figura 4 do trabalho de Chen & Wallender (1984), com a distribuições das isolinhas correspondentes respectivamente, aos perfis II e III e ao perfil IV.

Na disposição triangular, conforme observado por Chen & Wallender (1984), não existe eixo de simetria das isolinhas de CUC. Na distribuição triangular, observa-se que, para valores de $Sp/DM < 0,6$, na medida em que os valores de SI/DM crescem, as isolinhas de CUC tornam-se quase paralelas ao eixo de SI/DM . Esse comportamento ocorre porque, sob valores reduzidos de Sp/DM , os aspersores localizados em linhas adjacentes preenchem as lacunas deixadas pelo aumento da distância entre aspersores na linha (SI). A falta de simetria

ocorre porque esse efeito compensatório não é observado quando o espaçamento entre aspersores na lateral é reduzido ($S_l < 0,6DM$) e o espaçamento entre as linhas, ao longo da linha principal (S_p/DM), é aumentado.

Os resultados mostrados na Figura 5 confirmam, também, as observações de Chen & Wallender (1984) quanto à dificuldade de se demonstrar, na ausência de vento, a superioridade da disposição triangular entre aspersores. A dificuldade de se demonstrar a superioridade da disposição triangular é decorrente da semelhança, dentro de um mesmo tipo de perfil, na distribuição espacial das isolinhas de uniformidade no canto direito inferior ($S_p \geq S_l$) das superfícies de resposta mostradas nas Figuras 4 e 5.

Na região de sobreposição completa de interesse prático ($S_p \geq S_l$), os valores de uniformidade mostrados na Figura 5 resultam nas seguintes recomendações de espaçamento, para o aspersor PLONA-RL250, operando em disposição triangular, em sistemas estacionários de irrigação: (i) condições operacionais (Tabela 1) que resultam no perfil do tipo I, devem ser evitadas, exceto em combinações de espaçamentos menores que 50% do diâmetro molhado; (ii) para os perfis II, III e IV; recomenda-se combinações envolvendo espaçamentos menores que, respectivamente, 60, 55 e 55% do DM; (iii) para os perfis II, III e IV; também são recomendadas combinações de espaçamentos envolvendo, respectivamente, os seguintes pares $0,4DM < S_l < 0,5DM$ e $0,6DM < S_p < 0,85DM$; $0,4DM < S_l < 0,5DM$ e $0,6DM < S_p < 0,85DM$; e $0,4DM < S_l < 0,5DM$ e $0,6DM < S_p < 0,85DM$.

A fragilidade do uso do Coeficiente de Uniformidade de Christiansen como único instrumento de seleção do espaçamento entre aspersores pode ser ilustrada na Figura 4. Nessa Figura, a disposição quadrada com $S_l = 0,8DM$ e $S_p = 0,8DM$, considerada “fair” na recomendação da Figura 5.8 de Keller & Bliesner (1990) para o perfil do tipo E, corresponde a um espaçamento que compromete a sobreposição das áreas molhadas pelos aspersores (o par $S_p = 0,8$, $S_l = 0,8$ está localizado na região acima da linha pontilhada). Nessa combinação de espaçamento entre aspersores, a distância máxima entre aspersores, que corresponde à diagonal do quadrado, atinge um valor de $2,26R$. Essa fragilidade do CUC é também responsável pela ocorrência de outros valores de CUC superiores a 80% nas regiões de sobreposição incompleta das áreas molhadas por aspersores adjacentes mostradas nas Figuras 4 e 5. Esse comportamento do CUC justifica a opção pelo uso de outros índices de uniformidade para a seleção de espaçamentos entre aspersores, a exemplo do “scheduling coefficient” (Oliphant & Zoldoske, 1989), desenvolvido pelo Center for Irrigation Technology nos EUA. No entanto, essas mesmas figuras ilustram o fato de que a inconveniência do uso do Coeficiente de Uniformidade de Christiansen pode ser contornada, através da seleção de combinações de espaçamentos situadas na região delimitada pela sobreposição completa das áreas molhadas (região abaixo das linhas pontilhadas das Figuras 4 e 5).

Uma das poucas recomendações de espaçamento entre aspersores que se mostra adequada para todos os perfis, e todas as disposições, é a que resulta em combinações de espaçamentos menores que 40% do diâmetro molhado. No entanto, conforme observado por Keller & Bliesner (1990), combinações envolvendo espaçamentos entre aspersores muito reduzidos tendem a exceder a capacidade de infiltração de água do solo.

Um procedimento que permite identificar as combinações de espaçamentos que excedem um dado valor de intensidade de aplicação de água é apresentado na Figura 6. Essa figura ilustra um exemplo de seleção dos espaçamentos entre aspersores, e da sua disposição, através das informações contidas nas Figuras 4 e 5, em uma área na qual o solo apresenta uma velocidade de infiltração básica de 10 mm h^{-1} . Nesse exemplo foi também considerado que o aspersor PLONA-RL250 deverá operar com bocais de $16 \times 6 \text{ mm}$, sob a pressão de serviço de

490 kPa, resultando em um perfil do tipo IV (Tabela 1), com vazão de $23,8 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ e raio de alcance de 40,5 m. Nessa condição, a vazão adimensional, dada pela equação 5, assume um valor igual a 0,36, que foi delimitado, através da equação 6, pelas linhas pontilhadas de cor azul mostradas nas superfícies de resposta da Figura 6. Deste modo, tanto para o arranjo retangular como para o arranjo triangular (Figura 6) dos aspersores, as combinações de espaçamentos entre aspersores a serem selecionadas estão limitadas à região situada acima da linha de infiltração de água (linha azul) e abaixo da linha que garante a sobreposição das áreas molhadas por aspersores adjacentes (linha amarela).

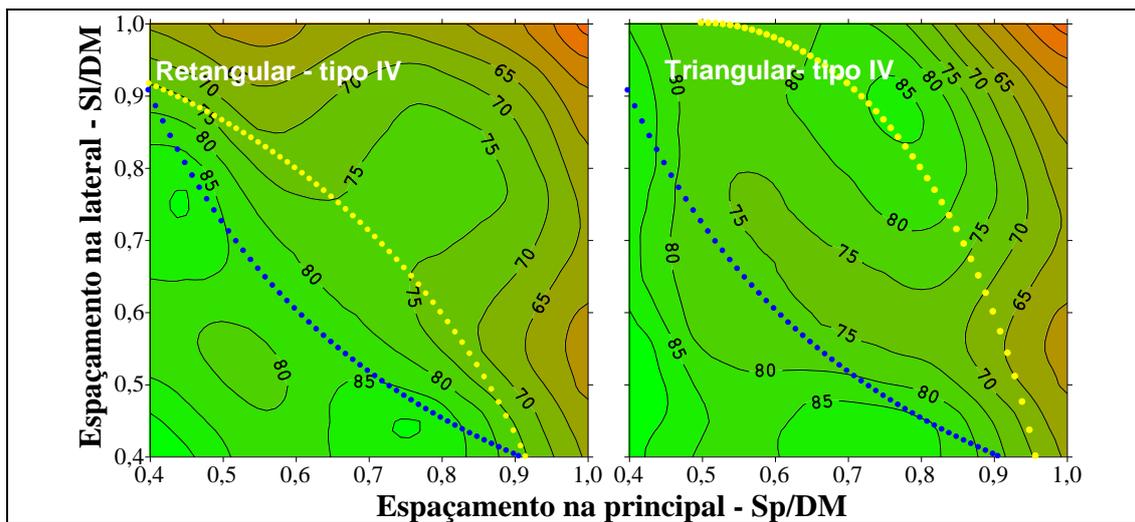


Figura 6. Isolinhas de uniformidade de aplicação de água (CUC) com linhas de mínima sobreposição de água (amarela) e de vazão adimensional (azul), geradas para o aspersor PLONA-RL250 operando em sistemas estacionários, em disposição triangular e retangular, com bocais de 16 x 6 mm e pressão de 490 kPa (Perfil IV).

A abrangência da região das possíveis combinações de espaçamentos, mostrada na Figura 6, pode ser reduzida mais ainda quando se considera, por razões econômicas, a linha diagonal correspondente a região na qual $S_l < S_p$. Neste caso, em função dos valores de CUC, apresentados na Figura 6, as combinações mais adequadas de espaçamentos envolveriam valores de S_l próximos de 45% do diâmetro molhado e valores de S_p próximos de 85% do diâmetro molhado.

6 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos conclui-se que: i) a seleção de espaçamento de aspersores deve ser baseada nas características do perfil radial de distribuição de água do aspersor; ii) superfícies de resposta da uniformidade de aplicação de água, com linhas de infiltração e de sobreposição completa, agilizam o processo de seleção dos espaçamentos e da disposição dos aspersores em sistemas estacionários de irrigação.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de Irrigação**. 7. ed. Viçosa: Imprensa Universitária, 2005. 611 p.

CARRIÓN, P.; TARJUELO, J. M.; MOTERO J. SIRIAS: a simulation model for sprinkler irrigation. I. Description of model. **Irrigation Science**, New York, v. 20, n. 2, p. 73-84, June 2001.

CÉSAR, J. H. F. et al. Avaliação técnica de um aspersor canhão do tipo turbina. **Ciência Agrotécnica**, Lavras, v. 28, n. 4, p. 932-941, jul./ago. 2004.

CHEN, D.; WALLENDER, W. W. Economic sprinkler selection, spacing and orientation. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 27, n. 3, p. 737-743, 1984.

CHRISTIANSEN, J. E. **Irrigation by sprinkling**. Berkeley: California Agricultural Station, 1942. 124 p. (Bulletin, 670).

CLEMMENS, A. J. Irrigation uniformity relationships form irrigation system management. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 117, n. 5, p. 682-699, Sept./Oct. 1991.

FRIZZONE, J. A.; DOURADO NETO, D. Avaliação de sistemas de irrigação. In: MIRANDA, J. H.; PIRES, R. C. M. **Irrigação**. Jaboticabal: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 2003. p. 573-651.

KELLER, J.; BLIESNER, R. D. **Sprinkle and trickle irrigation**. New York: ed. AnaviBook; Van Nostrand Reinhold, 1990. 652 p.

LI, J. Sprinkler performance as function of nozzle geometrical parameters. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 122, n. 4, p. 244-247, July/Aug. 1996.

MARTÍN-BENITO, J. M. T.; GÓMEZ, M. V.; PARDO, J. L. Working conditions of sprinkler to optimize application of water. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 118, n. 6, p. 895-913, Nov./Dec. 1992.

OLIPHANT, J. C.; ZOLDOSKE, D. F. **Sprinkler profile and coverage evaluation (SPACE)**: software and documentation. Fresno: Center For Irrigation Technology, California State University, 1989. 39 p.

PEREIRA, G. M. **Simulação das perdas de água por evaporação e da uniformidade de distribuição na irrigação por aspersão**. 1995. 125 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1995.

PRADO, G.; COLOMBO, A. Caracterização técnica do aspersor PLONA-RL300. **Irriga**, Botucatu, v. 10, n. 1, p. 53-63, jan./abr. 2005.

SEGINER, I. et al. Indoor measurement of single-radius sprinkler patterns. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, v. 35, n. 2, p. 523-533, Mar./Apr. 1992.

SOCCOL, O. J. et al. Uniformidade de aplicação de água de irrigação com canhão hidráulico sob diferentes disposições e espaçamentos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 33., 2004, São Pedro. **Anais...** Jaboticabal: SBEA, 2004. p. 1-4.

TARJUELO, J. M. **El riego por aspersión y su tecnología**. 2. ed. Madrid. Mundi Prensa Libros, 1999. 529 p.