

DISTRIBUIÇÃO DA CARGA HIDRÁULICA EM LINHAS DE DERIVAÇÃO OTIMIZADAS POR PROGRAMAÇÃO LINEAR¹

JOÃO C. C. SAAD², FRANCISCO F. N. MARCUSSI³

RESUMO: A existência de diferentes combinações de uniformidade de emissão na unidade operacional com a declividade do terreno favorece a ocorrência de várias possibilidades de configurações no sistema de irrigação, por conseguinte de diferentes custos de implantação e de posterior manejo do sistema. Desde que bem dimensionado, consegue-se verificar, no sistema de irrigação localizada, que a otimização do sistema por meio da programação linear é a melhor metodologia frente aos outros métodos propostos na pesquisa operacional, visto que se encontra a solução ótima global para as variáveis preestabelecidas no dimensionamento. Este trabalho teve por objetivo, analisar a distribuição da carga hidráulica na linha de derivação, sob diferentes uniformidades de emissão e declividades do terreno, calculada por programação linear. Os resultados obtidos permitem análise consistente dos parâmetros hidráulicos da uniformidade de emissão preestabelecida para a linha de derivação. Observa-se, em todos os casos, comportamento decrescente de variação da carga hidráulica, ocorrendo em maior intensidade na seguinte ordem de uniformidade de emissão: 80% > 83% > 86% > 89% > 92%. Já os pontos de menor carga hidráulica, a 3% de declividade, encontram-se na décima primeira saída em todas as uniformidades de emissão testadas.

PALAVRAS-CHAVE: irrigação localizada, pesquisa operacional, uniformidade de emissão.

HYDRAULIC HEAD DISTRIBUTION ON MANIFOLDS OPTIMIZED BY LINEAR PROGRAMMING

ABSTRACT: The possibility of different emission uniformity combinations and land slope inside an irrigation sector enables different irrigation system design possibilities that result on different acquisition and operational costs. Taken as reference a well-designed microsprinkler irrigation, one can verify that linear programming (LP) is the best methodology for optimization of the system design, as compared to the other operational research methods, since in the LP algorithm, the global optimum solution for the variable pre-established is found. This work aimed to analyze the distribution of the hydraulic head on manifolds, under different uniformities of emission and land slope, by applying programming. The results found allowed a consistent analysis of the hydraulic parameters of the derivation line affecting the emission uniformity. A decreasing behavior of the hydraulic head variation along the derivation line is observed in all cases, occurring in higher intensity in the following emission uniformity order: 80% > 83% > 86% > 89% > 92%. In addition, points of lower hydraulic head for lines at 3% land slope are found in the eleventh exit for all emission uniformity tested.

KEYWORDS: irrigation, operational research, uniformity.

INTRODUÇÃO

A diferença fundamental entre microaspersão e o sistema por aspersão convencional fixo é que, no primeiro, se utiliza, na maioria das vezes, de um aspersor (microaspersor) para cada planta (árvore) da cultura irrigada. Um conceito a se interpretar com cautela é o de uniformidade de

¹ Extraído da dissertação de mestrado do segundo autor. Financiada pelo CNPq.

² Eng^o Agrônomo, Prof. Doutor, Departamento de Engenharia Rural, FCA/UNESP, Botucatu - SP, Fone: (0XX14) 3811.7194, joaosaad@fca.unesp.br

³ Eng^o Agrônomo, Doutorando em Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos - USP, São Carlos - SP, marcussi@sc.usp.br

Recebido pelo Conselho Editorial em: 30-1-2006

Aprovado pelo Conselho Editorial em: 25-8-2006

emissão do sistema de irrigação localizada frente a diferentes declividades em que esse possa ser instalado. A uniformidade de emissão é resultado conjunto das características do equipamento e de suas configurações hidráulicas. Segundo LISBOA (2005), a formulação do problema a ser resolvido por programação linear segue alguns passos básicos: deve ser definido o objetivo básico do problema, ou seja, a otimização a ser alcançada; para que esta função-objetivo seja matematicamente especificada, devem ser definidas as variáveis de decisão envolvidas; essas variáveis normalmente estão sujeitas a uma série de restrições, normalmente representadas por inequações.

Estudos de pesquisa operacional em irrigação, utilizando a programação linear, requerem aceção prévia da configuração (*lay-out*) da rede hidráulica. Também as condições operacionais do sistema devem ser pré-elaboradas, sendo que a otimização se faz quanto à combinação de diâmetros da rede hidráulica.

Este trabalho teve por objetivo, com o uso da programação linear, analisar a distribuição da carga hidráulica na linha de derivação, com diferentes uniformidades de emissão e declividades do terreno.

MATERIAL E MÉTODOS

Os embasamentos inseridos no modelo de programação linear de minimização foram: o dimensionamento foi feito para as seguintes uniformidades de emissão (%): 80; 83; 86; 89 e 92; a configuração da rede hidráulica e as condições operacionais foram definidas previamente; as linhas laterais apresentam diâmetro único e estão em nível; as linhas de derivação operam em declive ou em nível; as linhas de derivação apresentam diâmetros variáveis e estão sujeitas às seguintes declividades (%): 0; 3; 6; 9 e 12; as linhas laterais são de polietileno, e as demais, de PVC; as unidades operacionais são compostas por: válvula reguladora de carga hidráulica, linha de derivação, linhas laterais e emissores (Figura 1).

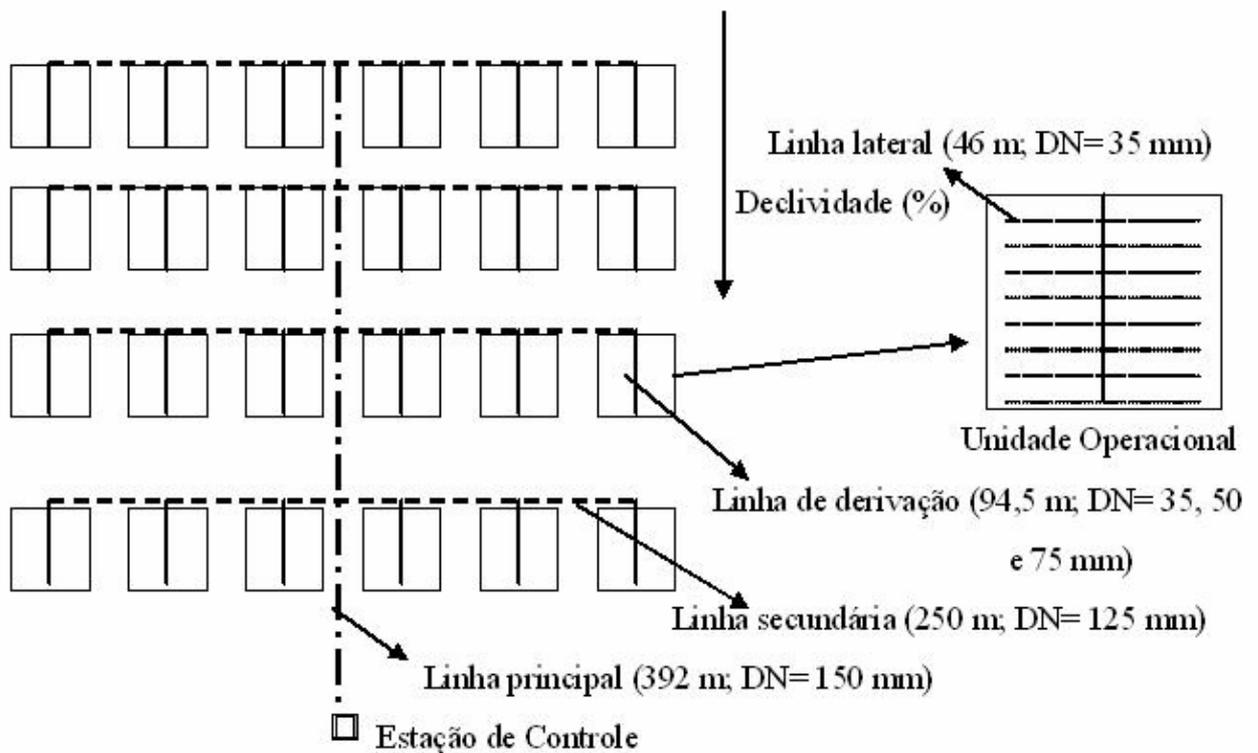


FIGURA 1. Esquema do sistema de irrigação por microaspersão contendo 24 unidades operacionais com os respectivos comprimentos de cada linha e os diâmetros nominais (DN).

A função-objetivo a ser minimizada, representando o custo anual do sistema de irrigação, a saber:

$$CT = \frac{10000[(C_e + C_{pe} + C_{pvc} + C_v + C_p + C_{cp} + C_f) CRF + C_{pp} + C_{água}]}{A_t} \quad (1)$$

em que,

CT - custo anual do sistema de irrigação, US\$ ha⁻¹;

C_e - custo total com emissores, US\$;

C_{pe} - custo com tubulação de polietileno, US\$;

C_{pvc} - custo com tubulação de PVC, US\$;

C_v - custo com válvulas, US\$;

C_p - custo com sistema de bombeamento, US\$;

C_{cp} - custo com painel de controle, US\$;

C_f - custo do sistema de filtragem, US\$;

CRF - fator de recuperação do capital;

C_{pp} - custo anual com bombeamento, US\$;

C_{água} - custo com aquisição da água consumida durante o ciclo, US\$ ano⁻¹, e

A_t = área total a ser irrigada, m².

Os componentes da função-objetivo, segundo SAAD (2002), são estimados utilizando as seguintes equações:

$$C_e = N_s N_l N_m P_m \quad (2)$$

$$C_{pe} = N_s N_l L_L P_{pe} \quad (3)$$

$$C_{pvc} = N_s \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I PM_i LM_{j,i} + 2 \sum_{k=1}^K \sum_{r=1}^R PS_r LS_{k,r} + \sum_{k=1}^K \sum_{v=1}^V PN_v LN_{k,v} \quad (4)$$

$$C_v = N_s P_v \quad (5)$$

$$C_{pp} = \frac{10,787 Q_{su} N_s HT I_d I_h E}{I_f \eta} \quad (6)$$

em que,

N_s - número de unidades operacionais;

N_l - número de linhas laterais na unidade operacional;

N_m - número de microaspersores na linha lateral;

P_m - preço do microaspersor, US\$ unidade⁻¹;

L_L - comprimento da linha lateral, m;

P_{pe} - preço do tubo de polietileno, US\$ m⁻¹;

PM_i - preço do tubo de PVC com diâmetro *i* utilizado na linha de derivação, US\$ m⁻¹;

LM_{j,i} - comprimento (m) da tubulação de PVC com diâmetro *i* na seção *j* da linha de derivação;

PS_r - preço do tubo de PVC com diâmetro *r* utilizado na linha secundária, US\$ m⁻¹;

LS_{k,r} - comprimento (m) da tubulação de PVC com diâmetro *r* utilizada na linha secundária *k*;

PN_v - preço do tubo de PVC com diâmetro *v* utilizado na linha principal, US\$ m⁻¹;

LN_{k,v} - comprimento (m) da tubulação de PVC com diâmetro *v* utilizada na seção *k* da linha principal;

P_v - preço da válvula, US\$ unidade⁻¹;

Q_{su} - vazão da unidade operacional, m³ s⁻¹;

HT - altura manométrica total, m;

I_d - número de dias de irrigação durante o ciclo da cultura;

I_h - número de horas de irrigação por conjunto de unidades operacionais atuando simultaneamente;

I_f - turno de irrigação, dias;

E - tarifa da energia elétrica, US\$ kWh⁻¹, e

η - rendimento do conjunto motobomba.

A equação utilizada para determinar a relação da vazão com a perda de carga no sistema foi a equação de Darcy-Weisbach (Fórmula Universal de perda de carga).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com os resultados obtidos de distribuição da carga hidráulica na linha de derivação (Figuras 2; 3; 4; 5 e 6), consegue-se verificar as tendências de aumento ou diminuição ao longo da linha de derivação, bem como identificar sua carga hidráulica máxima e mínima, para diferentes valores de uniformidade de emissão e declividade do terreno.

Na Figura 2, que mostra o comportamento hidráulico da linha de derivação a 80% de Uniformidade de Emissão (UE) em terrenos com 0; 3; 6; 9 e 12% de declividade, verifica-se que a 0% de declividade o ponto de maior carga hidráulica está na primeira saída, e o de menor carga hidráulica está na última, tendendo à inversão gradativa até 12% de declividade, quando o ponto de maior carga hidráulica passa a ser a última saída, e o de menor carga hidráulica, a primeira saída. Isso se deve ao fato de a declividade estar a favor do fluxo. Por exemplo, para a condição de 12% de declividade, a perda de carga na tubulação não é suficiente para superar a carga hidráulica ganha frente à declividade do terreno.

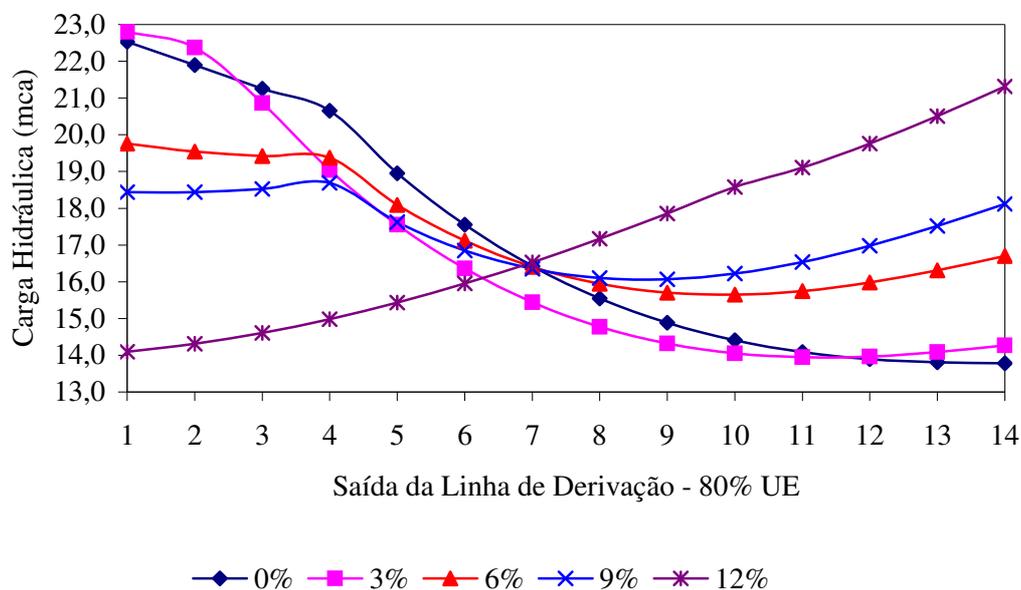


FIGURA 2. Carga hidráulica na linha de derivação, com 80% de UE, nas declividades de 0; 3; 6; 9 e 12%.

Os pontos de inflexão nas curvas de carga hidráulica versus saídas da linha de derivação correspondem a mudanças de diâmetros (Tabela 1). Nota-se, também, na Figura 2, que, a 3; 6 e 9% de declividade, o ponto de maior carga hidráulica é, na maioria das vezes, a primeira saída, e o ponto de menor carga hidráulica é a décima primeira saída para 3%, a décima saída para 6% e a nona saída para 9% de declividade. Analisando a carga hidráulica na primeira saída da linha de derivação, verifica-se que o maior valor (22,8 mca) ocorreu na declividade de 3% e o menor valor (14,1 mca) na declividade de 12%, sendo a diferença de carga hidráulica de 8,7 mca (38,2%). Nota-se, também, que, a 80% de UE, a declividade que proporcionou menor alteração de carga hidráulica na linha de derivação foi de 9%, apresentando variação de apenas 12,5% da maior carga hidráulica (18,4 mca) para a menor (16,1 mca).

Na Figura 3, observa-se o comportamento hidráulico da linha de derivação a 83% de UE em terrenos com 0; 3; 6; 9 e 12% de declividade; verifica-se que, a 0% de declividade, o ponto de maior carga hidráulica está na primeira saída, e o de menor, na última, tendendo à inversão gradativa até a 12% de declividade, quando o ponto de maior carga hidráulica passa a ser a última saída, e o de menor carga hidráulica, a primeira saída, tendo, portanto, como única diferença da

Figura 2, a menor amplitude de variação de carga hidráulica na primeira saída da linha de derivação. Isso se deve ao fato de a declividade estar a favor do fluxo. Como no caso anterior, a 80% de UE, para condição de 12% de declividade, a perda de carga na tubulação não é suficiente para superar a carga hidráulica ganha frente à declividade.

TABELA 1. Comprimento da tubulação da linha de derivação conforme seus respectivos diâmetros, segundo a uniformidade de emissão e a declividade do terreno.

UE	Declividade -----%-----	Diâmetro (mm)		
		35	50	75
		-----m-----		
80	0	71,0	23,5	
	3	81,5	13,0	
	6	70,0	24,5	
	9	70,0	24,5	
	12	28,0	66,5	
83	0	60,3	34,2	
	3	73,5	21,0	
	6	70,0	24,5	
	9	70,0	24,5	
	12	30,6	63,9	
86	0	43,9	50,6	
	3	63,4	31,1	
	6	70,0	24,5	
	9	70,0	24,5	
89	0	21,0	63,9	9,6
	3	48,3	46,2	
	6	63,4	31,1	
	9	70,0	24,5	
92	0	7,0	35,0	52,5
	3	29,0	56,3	9,2

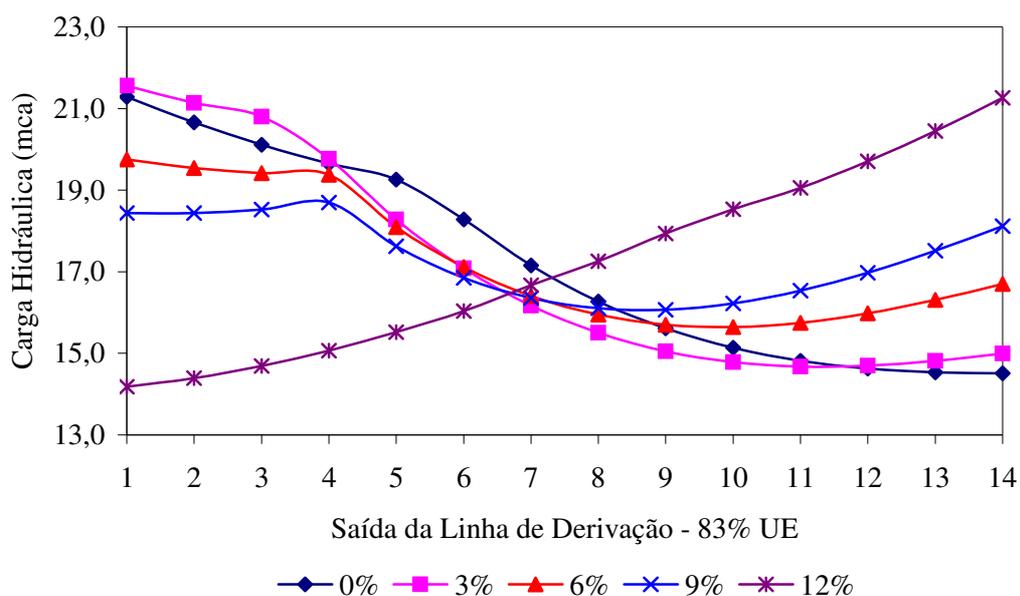


FIGURA 3. Carga hidráulica na linha de derivação, com 83% de UE, nas declividades de 0; 3; 6; 9 e 12%.

Pela Figura 3, observa-se o comportamento hidráulico da linha de derivação a 86% de UE para terrenos com 0; 3; 6 e 9% de declividade. Verifica-se que, a 0% de declividade, o ponto de maior carga hidráulica está na primeira saída para as linhas laterais, e o de menor está na última, tendendo à inversão gradativa até 9% de declividade, quando o ponto mínimo de carga hidráulica ocorre na nona saída. No que tange ao diâmetro da tubulação (Tabela 1), diferentemente dos casos anteriores, observa-se que, quanto maior a declividade, maior o comprimento da tubulação usando diâmetro menor, sendo o inverso verdadeiro. Verifica-se que, a 12% de declividade, o programa de modelagem e otimização (GAMS (2003) General Algebraic Modeling System) deu o resultado para o cálculo do custo fixo do sistema de irrigação como não-ótimo.

Observando a Figura 4, verifica-se o desempenho hidráulico da linha de derivação a 89% de UE para 0; 3; 6 e 9% de declividade. Verifica-se que, a 0% de declividade, o ponto de maior carga hidráulica está na primeira saída para as linhas laterais, e o de menor está na última, tendendo à inversão gradativa até a 9% de declividade, quando o ponto mínimo de carga hidráulica ocorre na nona saída. Verifica-se que, a 12% de declividade, o programa GAMS deu o resultado para o cálculo do custo fixo do sistema de irrigação como não-ótimo. Para os diâmetros (Tabela 1), verifica-se que, quanto maior é a UE, maior é o comprimento da tubulação utilizando diâmetro maior.

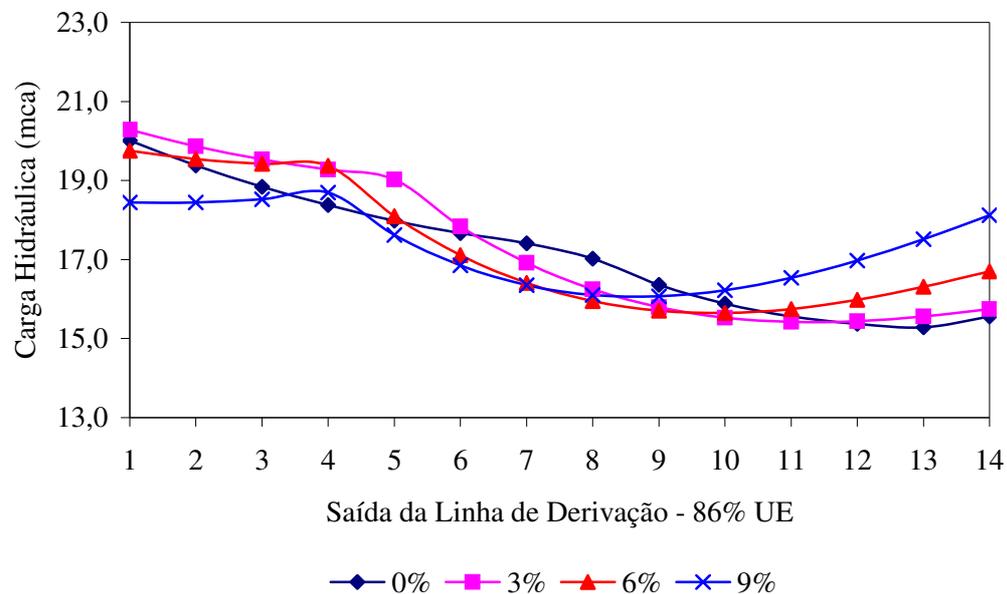


FIGURA 4. Carga hidráulica na linha de derivação, com 86% de UE, nas declividades de 0; 3; 6 e 9%.

Com a Figura 5, observa-se o desempenho hidráulico da linha de derivação a 92% de UE e com 0 e 3% de declividade. Verifica-se que, a 0% de declividade, o ponto de maior carga hidráulica está na primeira saída para as linhas laterais, e o de menor está na última, sendo que, a 3% de declividade, o ponto de maior carga hidráulica também é a primeira saída, contudo tendo dois pontos de menor carga hidráulica: o primeiro no ponto seis e o segundo no ponto onze.

Observa-se, na Figura 5, que a 6; 9 e 12% de declividade, o programa GAMS deu o resultado para o cálculo do custo fixo do sistema de irrigação como não-ótimo. Nota-se que, a 92% de uniformidade de emissão e a 0% de declividade, o comprimento da tubulação com maior diâmetro (Tabela 1) é o maior de todos os casos estudados, devido à alta taxa de uniformidade estabelecida, tendendo à diminuição desse diâmetro quando a declividade chega a 3%. A variação da maior carga hidráulica (17,9 mca) para a menor (17,6 mca), na saída número um, foi de 0,3 mca, ou seja, do ponto de maior carga hidráulica na saída número um, que estava a 3% de declividade, ao ponto de menor carga hidráulica, que estava a 0% de declividade, a variação foi de apenas 1,7%. Observa-se além disso que, a 92% de UE, a declividade que proporcionou menor alteração de carga

hidráulica na linha de derivação foi a 0% de declividade, apresentando variação de apenas 4,5% da maior carga hidráulica (17,6 mca) para a menor (16,8 mca).

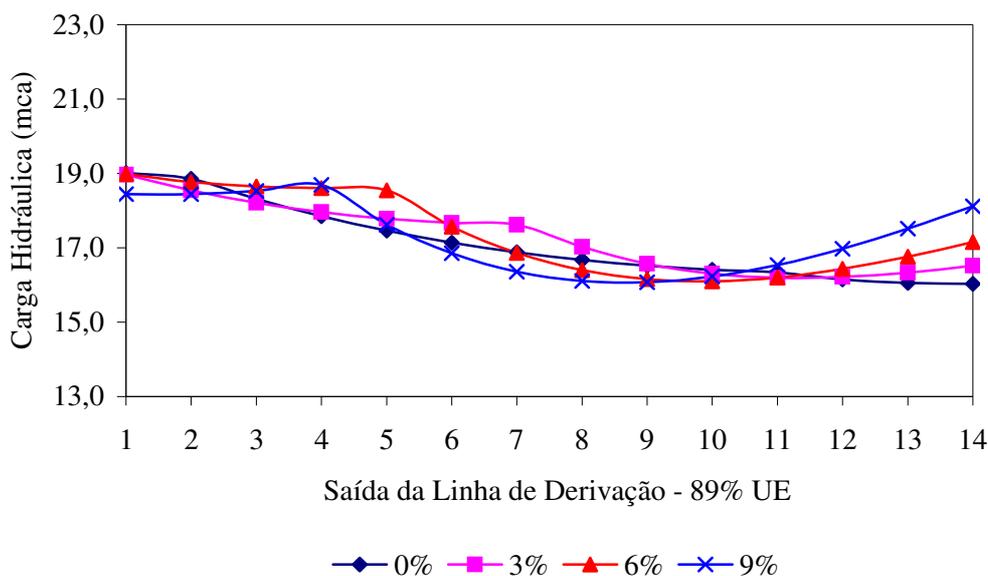


FIGURA 5. Carga hidráulica na linha de derivação, com 89% de UE, nas declividades de 0; 3; 6 e 9%.

Analisando as Figuras 2; 3; 4; 5 e 6, nota-se que a maior (22,8 mca) e a menor carga hidráulica (13,9 mca) de todos os resultados obtidos encontram-se na linha de derivação com 80% de UE e a 0% de declividade, apresentando variação de 8,9 mca, ou seja, variação de 39,0% em relação ao ponto de maior carga hidráulica. Verifica-se, também, que a menor variação de carga hidráulica na mesma linha é encontrada na linha de derivação com 92% de UE e a 0% de declividade, apresentando variação de 0,8 mca (17,6 a 16,8 mca), ou seja, variação de 4,5% em relação ao ponto de maior carga hidráulica. NAKAYAMA & BUCKS (1986) explicam esse fenômeno de comportamento hidráulico dizendo que a variação de carga hidráulica d'água é obtida nas relações de energia na linha, ou seja, o atrito causará perda de carga, e a declividade da linha irá causar perda (quando em aclave) ou ganho (quando em declive) da energia potencial. WU & GITLIN (1979) também citam que a variação de carga hidráulica ao longo da linha lateral (ou de derivação) pode ser determinada simplesmente por combinação linear de energia d'água (energia ganha pelo bombeamento d'água), por atrito e energia ganha ou perdida por declividade.

Verifica-se, também, que em todas as saídas número um das linhas de derivação, independentemente da UE, o ponto de maior carga hidráulica ocorreu a 3% de declividade, ou seja, sempre a maior carga hidráulica esteve nesse ponto; e também sempre o ponto de menor carga hidráulica ocorreu na saída número catorze, a 0% de declividade, independentemente da UE.

GILLESPIE et al. (1979) citam que o perfil de carga hidráulica ao longo da linha lateral ou de derivação pode ser determinado por meio da carga hidráulica de entrada, atrito e carga hidráulica ganha ou perdida, segundo a declividade. Pelos modelos de perfis de carga hidráulica propostos por GILLESPIE et al. (1979), verifica-se que, em nível, exceto para 86% de UE calculada para a linha de derivação, as curvas se encaixariam no tipo um, que ocorre quando a linha de derivação (ou lateral) está em nível ou aclave; sendo a carga hidráulica perdida por atrito para vencer a gravidade, ou seja, a carga hidráulica diminui com o comprimento da linha, sendo o ponto de máxima carga hidráulica na entrada e a mínima na última saída. Independentemente da UE calculada para a linha de derivação, as curvas de carga hidráulica para as declividades de 3; 6 e 9% deste estudo enquadraram-se no perfil de carga hidráulica tipo dois "a", segundo GILLESPIE et al. (1979), no qual a carga hidráulica máxima ocorre na entrada da linha, e a carga hidráulica mínima está localizada em algum lugar ao longo da linha. Com 80 e 83% de UE calculada para a linha de

derivação, verifica-se que a curva de 12% de declividade se encaixa no tipo três de perfil de carga hidráulica preconizado por GILLESPIE et al. (1979), no qual a energia ganha pela declividade é sempre maior do que a perda por atrito ao longo da linha, ou seja, nessas condições, a máxima carga hidráulica ocorre no final da linha, e a mínima, no começo da mesma.

Nas Figuras 6 e 7, é analisada a distribuição de carga hidráulica em função das uniformidades de emissão para as declividades de 0 e 3%, respectivamente. Observa-se, em todos os casos, comportamento decrescente de variação da carga hidráulica ocorrendo em maior intensidade na seguinte ordem: 80% > 83% > 86% > 89% > 92%. Observa-se, também, que os pontos de menor carga hidráulica a 0% de declividade se encontram na última saída para a linha lateral, nas uniformidades de emissão a 80; 83; 89 e 92%, e na penúltima saída para a linha lateral, na uniformidade de emissão de 86%. Já os pontos de menor carga hidráulica a 3% de declividade encontram-se na décima primeira saída, nas uniformidades de emissão de 80; 83; 86; 89 e 92%.

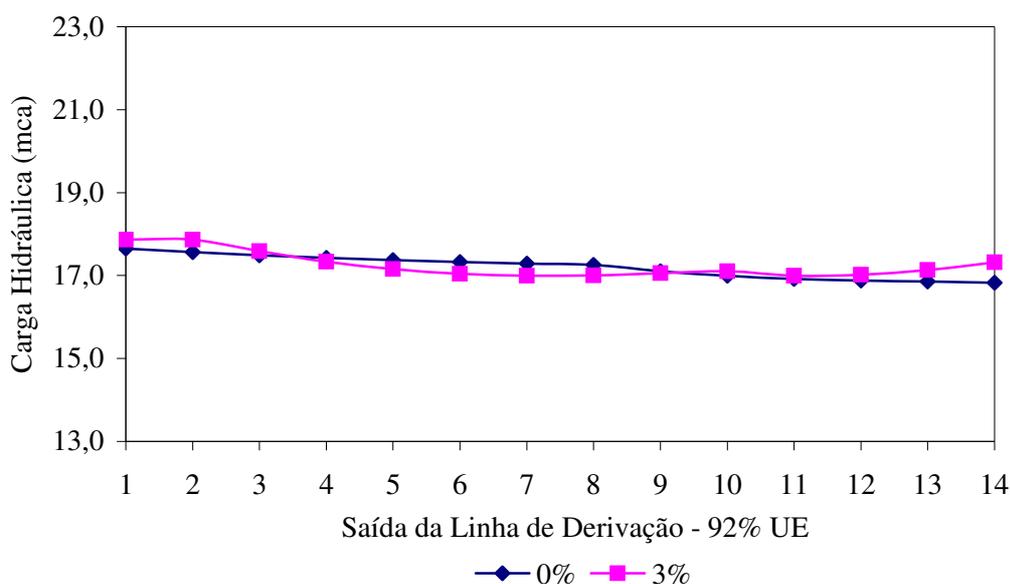


FIGURA 6. Carga hidráulica na linha de derivação, com 92% de UE, nas declividades de 0 e 3%.

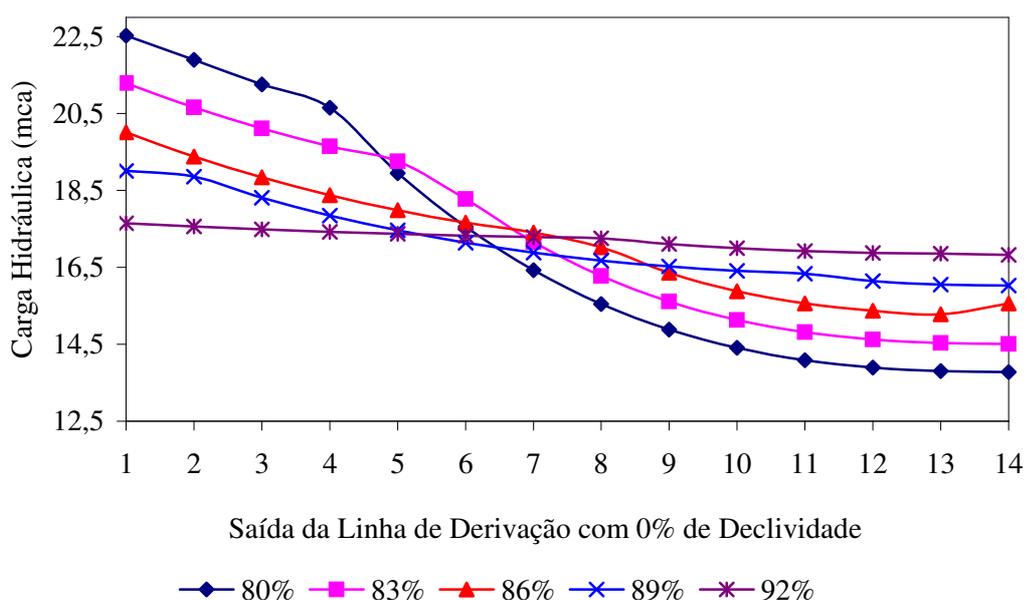


FIGURA 7. Carga hidráulica (mca) na linha de derivação, na saída para as linhas laterais, com 80; 83; 86; 89 e 92% de UE, sob declividade de 0%.

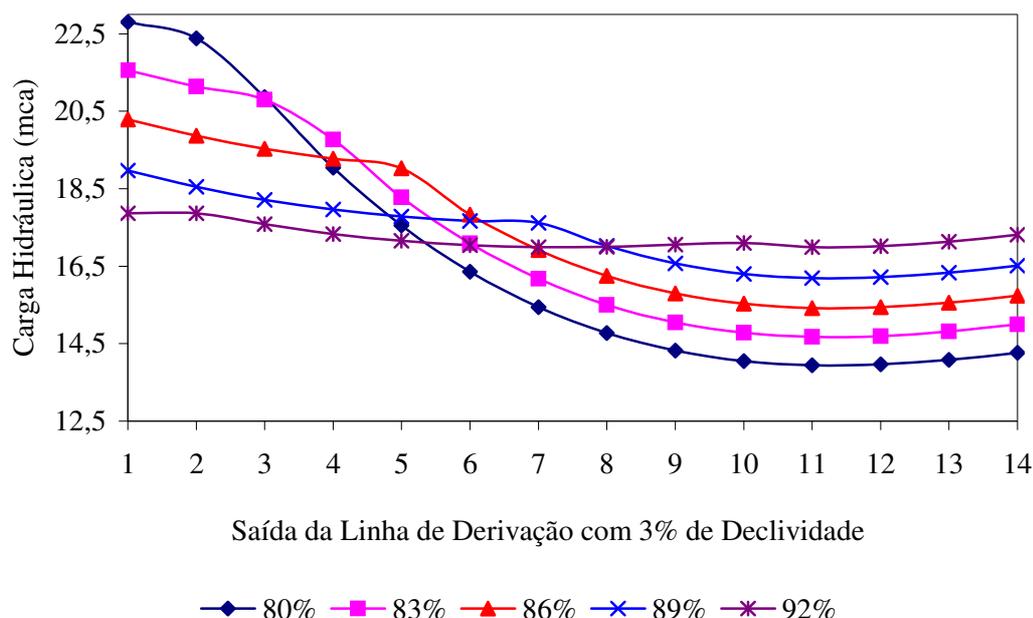


FIGURA 8. Carga hidráulica (mca) na linha de derivação, na saída para as linhas laterais, com 80; 83; 86; 89 e 92% de UE, sob declividade de 3%.

CONCLUSÕES

Em todas as combinações avaliadas de declividade e uniformidade de emissão, o tipo de perfil de distribuição de carga hidráulica na linha de derivação foi definido pela grandeza da declividade. Nas declividades 0; 3; 6 e 9%, a carga hidráulica máxima sempre ocorreu no início da linha de derivação, sendo que a mínima esteve ou no final ou em algum ponto intermediário. Na declividade de 12%, o valor máximo ocorreu sempre no início e, o mínimo, sempre no final.

Quanto maior o valor da uniformidade de emissão, menor a variação de carga hidráulica na linha de derivação em declive, em todas as declividades avaliadas. A maior variação ocorreu com UE de 80% na condição em nível e a menor variação com UE de 92%, em nível.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq (Processo131498/2002-9), pelo fomento, e aos funcionários do setor computacional do Departamento de Engenharia Rural/UNESP/Botucatu.

REFERÊNCIAS

- GAMS. General Algebraic Modeling System. *Net*, Washington, 2003. Documentation. Disponível em: <<http://www.gams.com/>>. Acesso em: 8 de jun. 2003.
- GILLESPIE, V.A.; PHILLIPS, A.L.; WU, P. Drip irrigation design equations. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, New York, v.105, n.3, p.247-58, 1979.
- LISBOA, E.F.A. *Pesquisa operacional*. Rio de Janeiro, 2005. 56 p. Disponível em: <<http://www.ericolisboa.eng.br/>>. Acesso em: 15 fev. 2005. Apostila do Curso de Pesquisa Operacional.
- NAKAYAMA, F.S.; BUCKS, D.A. *Trickle irrigation for crop production*. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1986. 383 p.
- SAAD, J.C.C. *Modelos de programação linear e não-linear para otimização do dimensionamento e operação de sistemas de irrigação localizada*. 2002. 129 f. Tese (Livre-Docente em Irrigação e Drenagem) - Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2002.
- WU, P.; GITLIN, H. M. Drip irrigation design on non uniform slopes. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, New York, v.105, n.3, p.289-304, 1979.