

Otimização do Dimensionamento de um Sistema de Irrigação Localizado Utilizando Programação Linear

Optimization of the Dimensioning of a Localized Irrigation System Using Linear Programming

DOI:10.34117/bjdv6n12-324

Recebimento dos originais: 30/11/2020

Aceitação para publicação: 10/12/2020

Wlisses Matos Maciel

Engenheiro Agrônomo, Doutor em Agronomia/Irrigação e Drenagem pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará – IFCE/Campus Umirim - R. Carlos Antônio Sales, s/n - Floresta, Umirim - CE, Brasil, 62.660-000.
E-mail: wlisses@ifce.edu.br

João Carlos Cury Saad

Engenheiro Agrônomo, Doutor em Agronomia/Irrigação e Drenagem pela Universidade de São Paulo
Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Ciências Agrônômicas – UNESP/FCA/Campus Botucatu - Av. Universitária, 3780, Alto Paraíso, Botucatu – São Paulo, Brasil, 18.610-034.
E-mail: joaosaad@fca.unesp.br

RESUMO

Neste trabalho desenvolveu-se um modelo de Programação Linear (PL) visando minimização do custo anual da rede hidráulica de um sistema de irrigação por microaspersão e operacionais, em uma área de 8,16 ha. A função objetiva do modelo foi a minimização dos custos fixos, relativos aos equipamentos de irrigação e operacionais relativos a energia elétrica. O problema de otimização foi solucionado utilizando software GAMS/CPLEX. O sistema foi dividido em doze unidades operacionais e foram avaliados diferentes combinações de diâmetros de tubulações. O menor custo anual foi obtido no modelo de PL. de US\$ 1.501,03 ha⁻¹.ano⁻¹, valor este 7,65% menor que os encontrados no projeto do especialista, que foi de US\$ 1.615,90 ha⁻¹.

Palavras-chave: irrigação localizada, modelos matemáticos, planejamento, recursos hídricos.

ABSTRACT

In this work, a Linear Programming (PL) model was developed aiming at minimizing the annual cost of the hydraulic network of a micro sprinkler and operational irrigation system in an area of 8.16 ha. The objective function of the model was to minimize the fixed costs related to irrigation and operational equipment related to electric energy. The optimization problem was solved using GAMS/CPLEX software. The system was divided into twelve operating units and different combinations of pipe diameters were evaluated. The lowest annual cost was obtained in the PL model. of US\$ 1,501.03 ha⁻¹.yr⁻¹, a value that is 7.65% lower than those found in the specialist project, which was US\$ 1,615.90 ha⁻¹.yr⁻¹.

Keywords: localized irrigation, mathematical models, water resources, planning.

1 INTRODUÇÃO

A agricultura irrigada tem sido uma estratégia importante para otimizar a produção global de alimentos, gerando desenvolvimento sustentável no campo, empregos e renda (MANTOVANI et al., 2009; FREITAS 2019).

No Nordeste do Brasil, onde a maioria dos sistemas de irrigação em operação não foi implementada com base em um projeto adequado, segundo TELLES (1999), o uso da água na agricultura se agrava em razão de que não é ainda feita, de forma ampla, a cobrança pela utilização de recursos hídricos. Para regiões com deficiências hídricas, como é o caso do Nordeste, o combate às causas de desperdício, a utilização de métodos de menor consumo e de inovações tecnológicas, associadas à cobrança pela utilização da água, permitirão a racionalização do seu uso na agricultura e reduções consideráveis em seu consumo. A necessidade de incremento na eficiência do uso de água está claramente definida pela crise alimentar e pela escassez dos recursos hídricos (DELAVAR et al., 2012, NOORY et al., 2012, DANTAS NETO & FARIAS, 2013 ALARCÓN 2014, MONTEIRO 2014 e ASHOFTEH 2015).

A primeira aplicação da PL em problemas de operação determinística de reservatório foi feita em data anterior ao ano de 1962, sendo usada para um problema simplificado de redes de distribuição de água (SIMONOVIC, 1992). Segundo SAAD (2002), a PL é a técnica de Pesquisa Operacional mais utilizada nos problemas de otimização, dada a sua versatilidade e o fato de aplicar fundamentos matemáticos pouco sofisticados, ou seja, a análise e resolução de sistemas de equações lineares. A teoria da PL pode ser encontrada em textos de pesquisa operacional citados por LIMA & LANNA (2005) e FANG et al. (2011).

Modelos de PL visando a otimização de rede hidráulica de sistemas de irrigação fixos pressurizados (aspersão, microaspersão e gotejamento) e não pressurizados, tem como objetivo a minimização do custo da tubulação e acessórios, foram apresentados por ORON & KARMELI (1981); BERMANI & OFEN (1984); SAAD (2002); ZERIHUN et al. (2014a,b); ARIF.A.ANWAR (2016a,b); SINGH (2016); ASGARI (2016) e MOOSAVIAN (2017).

Diversos pesquisadores desenvolveram estudos para o dimensionamento dos sistemas de irrigação e difundiram novas aplicações de técnicas matemáticas e computacionais. Embora a hidráulica desses sistemas esteja bem compreendida, muitos trabalhos têm, como foco principal, este aspecto, entre os quais: LUCENA et al. (2006), VILLA et al. (2012) e SAYED-HOSSEIN et al. (2015). Outros trabalhos enfocam a importância da análise econômica dos investimentos, com dois principais objetivos: (a) a minimização dos custos de investimento e operacionais (b) maximização dos benefícios. Dentre essas análises destacam-se os trabalhos de HOLZAPFEL et al. (1990); SAAD & MARIÑO (2002); DELGADO et al. (2012); PAUTA et al. (2013); SABOUNI et al. (2013);

MONTEIRO (2014); SINGH (2014a,b); SANTOS JÚNIOR et al. (2014 e 2015); ARIF.A.ANWAR (2017) e HASHEMY SHAHDANY (2017).

Este trabalho busca avaliar o uso do modelo de PL para otimização dos custos fixos do dimensionamento de sistemas de irrigação localizada do tipo microaspersão e operacionais, tendo como metas: desenvolver modelo capaz de delimitar a configuração do dimensionamento ótima do sistema de irrigação localizada, sob o enfoque de minimização de custos fixos de implantação e operação.

2 REVISÃO DE BIBLIOGRAFIA

A PL tem sido amplamente utilizada na prática. Muitas situações práticas podem ser representadas por modelos desse tipo; também é comum encontrarmos esses modelos representando subproblemas de casos mais complexos. Embora tais modelos já tivessem sido propostos há mais tempo, o ano 1947 foi um marco na área de otimização, quando o método Simplex foi publicado, seguindo-se intensas pesquisas de novos métodos e implantações eficientes e aplicações em diversas áreas, tais como agricultura, planejamento de produção industrial, logística, telecomunicações, finanças e muitas outras. Outro marco importante ocorreu em 1984, com a publicação de um método de Pontos Inteiro, ao qual também sugeriram-se intensas pesquisas. Os métodos do tipo simplex e do tipo pontos inteiros são, atualmente, as principais ferramentas computacionais para a resolução de problemas de otimização linear.

A primeira aplicação da PL em problemas de operação determinística de reservatório foi feita em data anterior ao ano de 1962, sendo usada para um problema simplificado de redes de distribuição de água (DORFMAN, 1962; SIMONOVIC, 1992; ALMEIDA, 2001). Segundo Saad (2002) a PL é a técnica de Pesquisa Operacional mais utilizada nos problemas de otimização, dada a sua versatilidade e o fato de aplicar fundamentos matemáticos pouco sofisticados, ou seja, a análise e resolução de sistemas de equações lineares (LANZER, 1988). A teoria da PL pode ser encontrada em textos de pesquisa operacional tais como Wagner (1970) e Luenberger (1973) e Braga Jr. (1987), citados por Lima e Lanna (2005) e Fang et al (2011).

A PL pode auxiliar na tomada de decisões em diversas áreas, como na agricultura (MAINIÉ 1969; CAVALCANTE 2019; CENCI 2019). Valencia (1975) desenvolveu um modelo de PL para o planejamento da operação de um Distrito de Irrigação São Domingos, Baixa Califórnia no México. Autran (1978) fez o planejamento no Perímetro Irrigado de Morada Nova – CE, no Brasil, através da PL e Matanga e Mariño (1979) otimizaram a irrigação de três culturas, em Davis na Califórnia, nos Estados Unidos.

Modelos de PL visando a otimização de rede hidráulica de sistemas de irrigação fixos pressurizados (aspersão, microaspersão e gotejamento), tem como objetivo a minimização do custo da

tubulação e acessórios, foram apresentados por Oron e Karmeli (1981); Bermani e Ofen (1984) e Saad (2002).

Saad et al. (1994) utilizando modelos de PL para irrigação por gotejamento em um pomar de citros, demonstraram que o dimensionamento da rede hidráulica pode ser modificado quando se considera o custo da energia consumida na operação do sistema.

Pesquisadores desenvolveram um modelo de PL separável, para estudar a alocação de água de irrigação no Projeto Senador Nilo Coelho, localizado em Petrolina – PE, com o objetivo de maximizar a receita líquida. Assumiu-se que as funções de produção água-cultura disponíveis representavam adequadamente as relações água-produção. Tais funções, não lineares, foram incorporadas ao modelo de PL, que considera um conjunto de fatores técnicos que influenciam a rentabilidade do projeto de irrigação. As funções não lineares foram aproximadas por funções lineares por partes, possibilitando a utilização do método Simplex para a solução. Explicitaram-se restrições na disponibilidade de água, de área e de mercado (FRIZZONE et al., 1997).

Muitos pesquisadores têm se voltado para esse tema, considerando a aplicaram a técnica de PL para a maximização da receita líquida em diversos projetos e perímetros irrigados como: Acer (1990) em Guairá, SP; Dantas Neto et al (1997) no Senador Nilo Coelho, PE; Rodrigues et al (2000); Carvalho et al (2000) no Gorutuba, MG; Curi et al (2005) no semi-árido, PB; Santos et al (2009) no Baixo Acaraú, CE; Tavares et al (2011) no Agreste, PE; Delgado et al (2012) no Campos dos Goytacazes, RJ.

Saad e Mariño (2002) desenvolveram um modelo de PL para dimensionamento do sistema de irrigação localizada em área de declividade elevada. Uma vez que as linhas de derivação estão na direção da declividade, elas são dispostas em declive e dimensionadas com um ou mais diâmetros a fim de manter a variação de carga hidráulica entre duas linhas laterais quaisquer dentro do limite de variação que asseguram a uniformidade de emissão desejada.

Na minimização dos custos em projetos de irrigação (rede hidráulica) o uso da PL apresenta vantagens, dentre os quais se destacam: trabalhar com variável discreta (diâmetros comerciais); relatórios detalhados com diversos dados para suporte de decisões (análise de sensibilidade); e a simplicidade na utilização de programas computacionais específicos para resolução de equações lineares. Segundo Saad (2002) “a solução ótima, quando existente, é sempre um ótimo global, ou seja, dentro do universo de possibilidades previstas pelo modelo, não há solução melhor do que aquela fornecida”.

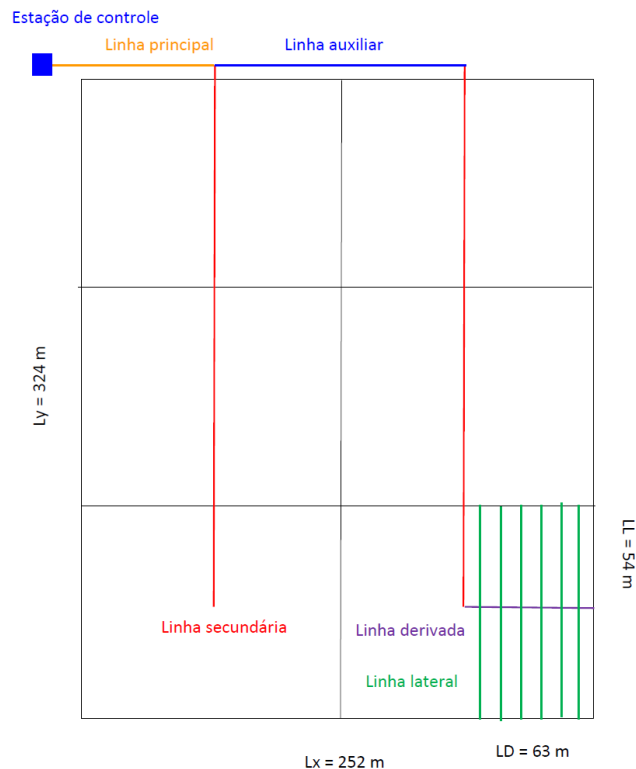
O desenvolvimento de modelos matemáticos para gerar programas de otimização para a agricultura tem recebido a atenção de muitos pesquisadores (CRISTANCHO, 1965; MAGALHÃES, 1971, WU e LIANG, 1972, ARAÚJO, 1972; PANAGIDES, 1973; BALARINE, 1975; HUANG et al.,

1975; SUGAI, 1976; TRAVA et al., 1977; TSAKIRIS e KIOUNTOUZIS, 1982; YARON e BRESSLER, 1983; HATCH et al., 1985; TSAI et al., 1987; BERNEDINI, 1988; BOMAN et al., 1989; MANNOCHI e MECARELLI, 1994; FRIZZONE, 1996; MAINUDDIN et al., 1997; SANTOS JUNIOR, 2001).

3 MATERIAL E MÉTODOS

Assume-se na formulação dos modelos que: (1) a área de 81.648 m², a ser irrigada, é retangular (Lx= 252 m e Ly = 324 m), em nível e o sistema é composto por uma linha principal, uma auxiliar, duas secundárias, doze derivações e laterais para o modelo PL (Figura 1); (2) as linhas laterais são polietileno e as outras são PVC; (3) o sistema é dividido em 12 unidades operacionais (UO); (4) o sistema será dimensionado com duas unidades operacionais funcionando simultaneamente (UOS); (5) o comprimento e a largura da área irrigada devem ser múltiplos da distância entre os pontos de emissão na linha lateral e da distância entre as linhas laterais; (6) a unidade é composta de linha de derivação, linhas laterais, emissores e válvula; (7) volume disponível 33,12 m³.h⁻¹; (8) a taxa de evapotranspiração diária máxima da cultura é constante do mês de maior demanda (5,97 mm.dia⁻¹); (9) serão simulados 245 dias de irrigação.

FIGURA 1. Ilustração do “Lay-out” de um sistema de irrigação por microaspersão contendo 12 unidades operacionais, utilizando no modelo de PL



3.1 FORMULAÇÃO DO MODELO DE PROGRAMAÇÃO LINEAR PL

a) Função objetivo

A função-objetivo a ser minimizada é o custo anual do sistema de irrigação, calculado por:

$$MIN CT = \frac{10000[(Ce + Cpe + Cpvc + Cv + Cpc + Cf + Cp)FRC + Cpp]}{A} \quad (1)$$

em que CT = custo anual do sistema de irrigação (US\$.ha⁻¹); Ce = custo total com emissores (US\$); Cpe = custo da tubulação de polietileno (US\$); $Cpvc$ = custo com tubulação de PVC (US\$); Cv = custo com válvulas (US\$); Cpc = custo com painel de controle (US\$); Cf = custo do sistema de filtragem (US\$); Cp = custo do sistema de bombeamento (US\$); FRC = fator de recuperação de capital ($i = 12\%$ aa, $n = 10$ anos); Cpp = custo anual de bombeamento (US\$) e A = área total a ser irrigada (m²).

Os componentes da função-objetivo são estimados utilizando as seguintes equações:

$$Ce = Ns.Nl.Nm.Pm \quad (2)$$

$$Cpe = Ns.Nl.LL.Ppe \quad (3)$$

$$Cpvc = Ns. \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I PDi.LDji + 2. \sum_{K=1}^K \sum_{R=1}^R PSr.LSkr + \sum_{K=1}^K \sum_{R=1}^R PAr.LAkr \quad (4)$$

$$+ \sum_{K=1}^K \sum_{V=1}^V PPv.LPkv$$

$$Cv = Ns.Pv \quad (5)$$

$$Cpp = \frac{10,787. Quo.Ns.ht.Id.Ik.E}{If.\eta} \quad (6)$$

em que: Ns = número de unidade operacionais; Nl = número de linhas laterais na unidade operacional; Nm = número de microaspersores na linha lateral; Pm = preço do microaspersor (US\$.unidade⁻¹); LL = comprimento da linha lateral (m); Ppe = preço do tubo de polietileno (US\$.m⁻¹); PDi = preço do tubo de PVC com o diâmetro i utilizado na linha de derivação (US\$.m⁻¹); $LDji$ = comprimento (m) da tubulação de PVC com diâmetro i na seção j da linha de derivação; PSr = preço do tubo de PVC com diâmetro r utilizado na linha secundária (US\$.m⁻¹); $LSkr$ = comprimento (m) da tubulação de PVC com diâmetro r utilizado na seção k da linha secundária; PAr = preço do tubo de PVC com diâmetro r utilizado na linha auxiliar (US\$.m⁻¹); $LAkr$ = comprimento (m) da tubulação de PVC com diâmetro r utilizado na seção k da linha auxiliar; PPv = preço do tubo de PVC com diâmetro v utilizado na linha principal (US\$.m⁻¹); $LPkv$ = comprimento (m) da tubulação de PVC com diâmetro v utilizado na seção k da linha principal; Pv = preço da válvula (US\$.unidade⁻¹); Quo = vazão da unidade operacional (m³.s⁻¹).

¹); ht = altura manométrica total (m); Id = número de dias de irrigação durante o ciclo da cultura; Ih = número de horas de irrigação por conjunto de unidades operacionais atuando simultaneamente; If = turno de irrigação (dias); E = tarifa de energia elétrica (US\$.kWh⁻¹); e η = rendimento do conjunto motobomba.

Uma vez que há duas linhas secundárias (uma na auxiliar e outra na principal), o fator 2 é utilizado no segundo termo do lado direito da Eq. 4. As variáveis de decisão são: LD_{ji} , LS_{kr} , LA_{kr} , LP_{kv} e altura manométrica total (ht).

b) Restrições

1) Área

Tais restrições são necessárias para assegurar que o sistema de irrigação a ser dimensionado tenha as dimensões coerentes com o “lay-out” previamente definido. Para a seção 1 ($j=1$) da linha de derivação:

$$\sum_{I=1}^I LD_{1i} = 0,5 \cdot EL \tag{7}$$

A distância entre o início da linha de derivação e o primeiro emissor é igual à metade do espaçamento regular entre emissores, razão pela qual se utiliza o fator 0,5 na Eq. 7. Para as seções $j = 2$ a J da linha de derivação:

$$\sum_{I=1}^I LD_{ji} = EL \tag{8}$$

Para as linha secundárias $k=1$ a K da linha secundária:

$$\sum_{R=1}^R LS_{kr} = S_k \tag{9}$$

Para as seções $k=1$ a K da linha auxiliar:

$$\sum_{R=1}^R LA_{kr} = A_k \tag{10}$$

Para as seções $k=1$ a K da linha principal:

$$\sum_{V=1}^V LP_{kv} = P_k \tag{11}$$

em que: EL = distância entre linhas laterais (m); LD = comprimento da seção j da linha derivada (m); Sk = comprimento da seção k da linha secundária (m); Ak = comprimento da seção k da linha auxiliar (m); Pk = comprimento da seção k da linha principal (m).

2) Dimensionamento da linha de derivação

A linha de derivação é dimensionada supondo-se que ela sempre esteja operando totalmente em declive, sendo que o modelo permite dimensionar todos os possíveis perfis I e II de pressão que podem ocorrer nessas condições.

Todos os perfis de pressão são detalhados por WU et al. (1986) e representados no modelo pelo seguinte conjunto de equações:

$$HD_o - HD_j \leq \Delta d \quad j = 1, \dots, J \quad (12)$$

$$HD_j - HD_o \leq \Delta d \quad j = 1, \dots, J \quad (13)$$

$$HD_g - HD_j \leq \Delta d \quad j = 1, \dots, J; g = 1, \dots, J; e g \neq j \quad (14)$$

em que HD_o = carga hidráulica no início da linha de derivação (m); HD_j = carga hidráulica na saída j da linha de derivação (m); HD_g = carga hidráulica na saída g da linha de derivação (m); e Δd = máxima variação da carga hidráulica permitida na linha de derivação (m).

A carga hidráulica média na linha de derivação é calculada por:

$$H_{av} = \frac{\sum_{j=1}^J HD_j}{\left(\frac{Nl}{2}\right)} \quad (15)$$

em que: HD_j = carga hidráulica na linha derivada; H_{av} = carga hidráulica média na linha de derivação (m).

3) Carga hidráulica nas saídas da linha de derivação

A carga hidráulica na entrada da linha lateral é calculada por (KELLER & BLIESNER, 1990):

$$H_w = kl + kl \cdot hfl \pm 0,5 \cdot \Delta El \quad (16)$$

em que H_w = carga hidráulica na entrada da linha lateral média (m); hw = pressão de operação do emissor (m); kl = 0,75 para linhas laterais com diâmetro único; 0,63 para linhas laterais com dois diâmetros e 0,5 para linha com 3 ou mais diâmetros (KARMELI & KELLER, 1975); hfl = perda de carga na linha lateral (m); ΔEl = diferença de nível (m) entre o início e o final da linha lateral, sendo positivo para laterais em aclave e negativo para laterais em declive.

A carga hidráulica no início da linha de derivação pode ser calculada pela seguinte equação:

$$HDo = kb + kb \cdot hfm \pm 0,5 \cdot \Delta Em \quad (17)$$

em que $kb = 0,75$ para linhas de derivação com diâmetro único; $0,63$ para linhas laterais com dois diâmetros e $0,5$ para linha com 3 ou mais diâmetros; hfm = perda de carga na linha de derivação (m); ΔEm = diferença de nível (m) entre o início e o final da linha lateral, sendo positivo para laterais em aclive e negativo para laterais em declive.

A perda de carga total por atrito na linha de derivação (hfm), em metros, é calculada por:

$$hfm = 1,05 \sum_{j=1}^J \sum_{j=1}^J JDji \cdot LDji \quad (18)$$

em que $JDji$ = gradiente de perda de carga ($m \cdot m^{-1}$) na tubulação de PVC com diâmetro i utilizado na seção j da linha de derivação; e $1,05$ = fator utilizado para compensar as perdas de carga localizadas.

A carga hidráulica na entrada da unidade operacional, antes da válvula, é calculada por:

$$Huo = HDo + Hv \quad (19)$$

em que Huo = carga hidráulica na entrada da unidade operacional (m); e Hv = perda de carga na válvula (m).

O modelo assume que as linhas laterais tem um único diâmetro e estão em nível. Desta forma, $k = 0,75$ e $\Delta El = 0$ na Eq. 18. Por outro lado, o processo de otimização vai gerar, na grande maioria dos casos, linhas de derivação com dois diâmetros, o que implica em $kb = 0,63$.

Substituindo-se as Eqs. 15, 16 e 17 na Eq. 19, tem-se:

$$Huo = 0,75 \cdot hfl + hw + Hv + 0,6615 \sum_{i=1}^I JDji \cdot LDji - 0,5LD \cdot dz \quad (20)$$

em que dz = gradiente de declive ($m \cdot m^{-1}$) na linha de derivação; e LD = comprimento da linha de derivação (m).

A carga hidráulica nas saídas da linha de derivação é estimada por:

Para $j = 1$:

$$HD_1 = HDo - 1,05 \sum_{i=1}^I JD_1i \cdot LD_1i + 0,5 \cdot EL \cdot dz \quad (21)$$

Para $j = 2$ a J :

$$HD_j = HD_{j-1} - 1,05 \sum_{i=1}^I JD_{1i} \cdot LD_{1i} + 0,5 \cdot EL \cdot dz \quad (22)$$

4) Dimensionamento das linhas secundárias

As linhas secundárias são dimensionadas em função da pressão requerida na entrada da unidade operacional (H_{uo}) e da pressão disponível na saída da linhas auxiliar (H_{k1}) ou principal (H_{k2}). Para $k = 1$ a K :

$$1,05 \sum_{r=1}^R JS_{kr} \cdot LS_{kr} \geq H_{k1} - H_{uo} \quad (23)$$

em que JS_{kr} = gradiente de perda de carga, em $m \cdot m^{-1}$, no tubo de PVC com diâmetro r utilizado na linha secundária k .

5) Carga hidráulica nas saídas das linhas auxiliar e principal

A carga hidráulica no início e nas saídas da linha auxiliar é calculada por:

$$H_a = H_1 - H_2 \quad (24)$$

Para $k = 1$ a K :

$$H_a = H_1 - A \cdot dz - 1,05 \sum_{r=1}^R JA_{KR} \cdot LA_{KR} \quad (25)$$

em que H_a = carga hidráulica na entrada da linha auxiliar (m); H_k = carga hidráulica na saída k da linha auxiliar (m); e JA_{kr} = gradiente de perda de carga ($m \cdot m^{-1}$) no tubo com diâmetro r utilizado na seção k da linha auxiliar.

A carga hidráulica no início e nas saídas da linha principal é calculada por:

$$H_o = h_t - H_{es} - H_s \quad (26)$$

Para $k = 1$ a K :

$$H_p = H_o - P \cdot dz - 1,05 \sum_{v=1}^V JP_{KV} \cdot LP_{KV} \quad (27)$$

em que H_p = carga hidráulica na entrada da linha principal (m); h_t = altura manométrica total (m); H_{es} = perda de carga na estação de controle (m); H_s = altura de seção (m); H_k = carga hidráulica na saída k da linha principal (m); e JP_{kv} = gradiente de perda de carga ($m \cdot m^{-1}$) no tubo com diâmetro v utilizado na seção k da linha principal.

6) Altura manométrica total

A altura manométrica total (ht) é igual à pressão total requerida para atender a unidade operacional que opera em condições mais críticas. O modelo assume que o fluxo de água da fonte para as unidades operacionais é feita em condições em aclave. Desta forma, a condição mais crítica é quando se irá suprir a unidade operacional mais distante.

$$ht = Huo + 1,05 \left(\sum_{r=1}^R JS_{kr} \cdot LS_{kr} + \sum_{i=1}^K JA_{KR} \cdot LA_{KR} + \sum_{v=1}^V JP_{kv} \cdot LP_{kv} \right) + (LD + LA + LP) \cdot dz + Hes + Hs \quad (28)$$

em que LD = comprimento da linha de derivação (m); LA = comprimento da linha auxiliar (m); e LP = comprimento da linha principal (m).

Na avaliação do modelo de PL utilizado, comparou-se os resultados por ele obtido com aqueles provenientes do modelo dimensionado por uma empresa especialista na área de irrigação.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O resultado do modelo de PL indicou para a linha de distribuição um trecho inicial de 45 m com diâmetro de 0,075 m e outro trecho de 18 m com 0,050 m de diâmetro, totalizando 63 m. Na linha secundária, um diâmetro único de 0,075 m para um trecho de 270 m. Já para as linhas auxiliar e principal encontrou-se um diâmetro de 0,075 e 0,100 m, para trechos de 126 e 63 m, respectivamente, resultado similar encontrado no modelo desenvolvido pelo especialista.

SAAD et al. (1994) desenvolveram um modelo de PL visando minimização do custo anual da rede hidráulica de um sistema de irrigação em um pomar de citros no Estado de São Paulo. Os resultados dos dimensionamentos realizados, o hidráulico-energético foi o mais econômico (custo total de US\$ 2.426,80 ha⁻¹), seguido pelo hidráulico (US\$ 2.429,64 ha⁻¹) e pelo calculado por especialista (US\$ 3.355,78 ha⁻¹).

Dos componentes do sistema os que mais afetam o custo total são, em termos médios e com relação aos custos fixos, os emissores representando 12,57%, as linhas laterais de PE com 17,49%, linhas de PVC com 19,45%, cavaletes e válvulas de controle com 23,47%, motobomba 10,94%, painel de controle 12,57% e o sistema de filtragem 3,95%, para o modelo de PL e 16,31%;14,68%;26,11%;16,36%;15,98%;6,45% e 4,06%, respectivamente para o modelo do especialista.

Na Tabela 1 tem-se um resumo dos dados de saída para os modelos de PL e do especialista para minimização dos custos anual do sistema de irrigação por microaspersão e operacionais. Verifica-se um custo total no modelo PL de US\$ 1.501,03 ha⁻¹.ano⁻¹, valor este 7,65% menor que os encontrados

no modelo do especialista que foi de US\$ 1.615,90 ha⁻¹.ano⁻¹. Para o custo com energia no modelo PL de US\$ 1.093,39 ha⁻¹.ano⁻¹, valor este 7,43% menor que os encontrados no modelo do especialista, que foi de US\$ 1.174,63 ha⁻¹.ano⁻¹. Já para o custo com o sistema de irrigação no modelo PL de US\$ 407,63 ha⁻¹.ano⁻¹, valor este 8,25% menor que os encontrados no modelo do especialista, que foi de US\$ 441,27 ha⁻¹.ano⁻¹.

TABELA 1. Dados de saída dos modelos de PL e do Especialista para minimização dos custos fixos do sistema de irrigação por microaspersão e operacionais em US\$.ha⁻¹.

Item	Modelo PL	Modelo do especialista
Emissores	3.289,44	3.318,88
Linha lateral de PE	2.280,96	2.986,57
Linhas de PVC	3.659,04	5.311,11
Cavalete e válvulas de controle	4.413,60	3.328,46
Motobomba	2.056,40	3.251,26
Painel de controle	2.363,38	1.315,13
Sistema de filtragem	743,11	826,50
Custo do sistema de irrigação (US\$)	18.805,93	20.337,91
Custo da energia (US\$.ano⁻¹)	8.919,19	9.590,69
Custo do sistema de irrigação (US\$.ha⁻¹.ano⁻¹) (A)	407,63	441,27
Custo da energia (US\$.ha⁻¹.ano⁻¹) (B)	1.093,39	1.174,63
Custo total (US\$.ha⁻¹.ano⁻¹) (A+B)	1.501,03	1.615,90

5 CONCLUSÕES

O modelo de PL desenvolvido pode ser aplicado com adequação para a análise e dimensionamento de sistemas de irrigação localizado. A obtenção do sistema de custo ótimo depende de uma análise conjunta dos custos de implantação, operação e outros fatores operacionais, como a definição das unidades, vazão, dentre outros.

O menor custo anual de implantação do sistema de irrigação e operação foi obtido com o modelo de PL, com o valor de US\$ 1.501,03 ha⁻¹.ano⁻¹, já o modelo do especialista obteve um valor de US\$ 1.615,90 ha⁻¹.ano⁻¹. Verificou-se uma diferença de 7,65% entre os modelos testados.

REFERÊNCIAS

- ALARCÓN, J.; GORRIDO, A.; JUANA, L.M. Optimal Water Allocation in Shortage Situations as Applied to an Irrigation Community. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.140, n.3 p.393-406, 2014.
- ARIF.A.ANWAR, P. E.; BHATTI, M. T.; VRIES, T. T. Modern Canal Operations Planner. I: Maximizing Delivery Performance Ratio. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.142, n.12 p.494-515, 2016a.
- ARIF.A.ANWAR, P. E.; BHATTI, M. T.; VRIES, T. T. Modern Canal Operations Planner. II: Minimizing Inequity. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.142, n.12 p.516-529, 2016b.

ARIF.A.ANWAR, P. E.; VRIES, T. T. Sequential Irrigation Scheduling Avoiding Night Irrigation. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.143, n.7 p.386-397, 2017.

ASHOFTEH, P. S.; HADDAD, O. B.; ALASHTI, H. A.; MARIÑO, M. A. Determination of Irrigation Allocation Policy under Climate Change by Genetic Programming. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.141, n.4 p.479-493, 2015.

ASGARI, H. R.; HADDAD, O. B.; PAZOKI, M. Weed Optimization Algorithm for Optimal Reservoir Operation. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.142, n.2 p.512-525, 2016.

CAVALCANTE, D. M.; SANTOS, E. dos S. Utilização da programação linear para maximização dos lucros da produção de pães em uma empresa de panificação / Use of linear programming to maximize the profits of bread production in a baking company. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba – PR, v. 5, n. 12, p. 28501-28511, dec, 2019.

CENCI, V. R. de S. Otimização de receita de uma escola de idiomas através do uso da programação linear / Recovery optimization of a language school through the use of linear programming. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba – PR, v. 5, n. 12, p. 30773-30783 dec, 2019.

ČISTÝ, M.; BAJTEK, Z.; BECOVÁ, A. Irrigation network design and reconstruction and its analysis by simulation model. **Journal of Civil Engineering**. V.09, Issue 1, 2014.

DELAVAR, M.; MOGHADASI, M.; MORID, S. Time Model for Optimal Water Allocation in Irrigation Systems during Droughts. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.138, n.6 p.517-524, 2012.

DELGADO, A. R. S. et al. Planejamento da agricultura irrigada no norte fluminense, utilizando diferentes técnicas de programação matemática. **Rev. Ele. Pesquisa Operacional para o Desenvolvimento**. Rio de Janeiro, v. 4, n. 3, p. 249-256, 2012.

FANG, H.; CHENG, Y.; YAN, S. Optimization on Water Resource System Operation Policy During Drought. **Journal of Water Resource and Protection**, [S.L.], v. 3, n. 2, p. 140-146, 2011.

FREITAS, M. A. de S. Gestão e modelagem hídrica em bacia hidrográfica do semiárido brasileiro / Water modeling and management in the catchment area of the brazilian semi-arid region. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba – PR, v. 5, p. 8344-8351 jul, 2019.

HASHEMY SHAHDANY, S. M.; HASAMI, Y.; MAJIDI, Y.; MAESTRE, J.M. Modern Operation of Main Irrigation Canals Suffering from Water Scarcity Based on an Economic Perspective. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.143, n.3 p.562-578, 2017.

HOLZAPFEL, E.A.; MARINO, M.A.; VALENZUELA, A. Drip irrigation nonlinear optimization model. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**. New York, 116(4):479-96, 1990.

LIMA, H. V. C., LANNA, A. E. L. Modelos para operação de sistemas de reservatórios: atualização do estado da arte. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.10, n. 3, p.5-22, 2005.

LUCENA, K. F. M.; GALVÃO, C. O.; GOMES, H. P. Dimensionamento de sistemas de microirrigação através de programação não linear considerando-se diferentes demandas hídricas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.10, n. 2, p. 252-260, 2006.

MAINIÉ, P. Cálculo económico en agricultura; aplicacion de los programas lineals y de juegos. Zaragoza: Acibia, 1969. 192p.

MANTOVANI, E. C.; BERNARDO, S.; PALARETTI, L. F. **Irrigação: princípios e métodos**. 3. ed. atual. e ampl. Viçosa, UFV. 2009. 355p.

MONTEIRO, R. N. F. **Modelo de programação não-linear para otimização do padrão de cultivo e retorno financeiro em áreas irrigadas** 74 p. Tese (Doutorado em agronomia: Irrigação e Drenagem) Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2014.

MOOSAVIAN, N. Multilinear Method for Hydraulic Analysis of Pipe Networks. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.143, n.8 p.562-575, 2017.

NOORY, H.; LIAGHAT, A. M.; PANSINEJAD, M.; HADDAD, O.B. Optimizing Irrigation Water Allocation and Multicrop Planning Using Discrete PSO Algorithm. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.138, n.5 p.437-444, 2012.

ORON, G. & KARMELI, D. Solid set irrigation system design using linear programming. **Water Resources Bulletin**, Urbana, 17(4):565-70, 1981.

PAUTA, C.M. L.; GARCÍA, R. P. Diseño óptimo de sistemas de riego a presión aplicación en casos (Ecuador). **Revista de Investigación Agraria y Ambiental**, v.4 (1), p.49-65, 2013.

SAAD, J. C. C.; TOMAZELA, C.; PERES, J. G.; PERES, F. C.; FRIZZONE, J. A. Otimização de um sistema de irrigação por gotejamento utilizando programação linear. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.29, n.5, p.797-805. 1994.

SAAD, J.C.C. **Modelos de programação linear e não linear para otimização do dimensionamento e operação de sistemas de irrigação localizada**. 2002. 129f. Tese (Livre-docência) - UNESP, Botucatu, 2002.

SAAD, J.C.C.; MARIÑO, M. A. Optimum desing of microirrigation systems in-sloping lands. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.128, n.2 p.116-124, 2002.

SABOUNI, S. M.; MARDANI, M. Application of Robust Optimization Approach for Agricultural Water Resource Management under Uncertainty. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.139, n.7 p.571-581, 2013.

SANTOS JÚNIOR, J. L. C dos; FRIZZONE, J. A.; PAZ, V. P. S. Otimização do uso da água no Perímetro Irrigado Formoso aplicando lâminas máximas de água. **Irriga**, v.19, p.196-206, 2014.

SANTOS JÚNIOR, J. L. C dos; FRIZZONE, J. A.; PAZ, V. P. S. Water use optimization through alternative water depths in the Formoso Irrigation District, **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.19, n.7, p.621-626, 2015.

SAYED-HOSSEIN, S. M.; PETERS, R.T.; LAMM, F. R. Design of Zero Slope Microirrigation Laterals: Effect of the Friction Factor Variation. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.141, n.10 p.541-453, 2015.

SIMONOVIC, S. Reservoir systems analysis: closing gap between theory and practice. **Journal Water Resources Planning and Management**, New York, v. 118, n. 3, p. 262-280, 1992.

SINGH, A. Simulation and Optimization Modeling for the Management of Groundwater Resources. I: Distinct Applications. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.140, n.4 p.474-488, 2014a.

SINGH, A. Simulation and Optimization Modeling for the Management of Groundwater Resources. II: Combined Applications. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.140, n.4 p.488-509, 2014b.

SINGH, A.; PANDA, S. N. M.; SAXENA, C. K.; VERMA, C. L. Optimization Modeling for Conjunctive Use Planning of Surface Water and Groundwater for Irrigation. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.142, n.3 p.435-447, 2016.

VILLA, F. G.; PRATS, A. G. Using Location-Allocation Algorithms to Distribute Multioutlet Hydrants in Irrigation Networks Design. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v.138, n.4 p.304-309, 2012.

ZERIHUN, D.; SANCHEZ, A. Simulation Field-Scale Sprinkler Irrigation System Hydraulic Model. I: Hydraulic Characterization. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.140, n.7 p.553-566, 2014a.

ZERIHUN, D.; SANCHEZ, A. Simulation Field-Scale Sprinkler Irrigation System Hydraulic Model. II: Hydraulic Simulation. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.140, n.7 p.567-582, 2014b.