

RESSALVA

Atendendo solicitação do autor ,
o texto completo desta dissertação
será disponibilizado somente a partir
de 19/02/2021.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de Botucatu



EVANIZE RODRIGUES CASTRO

**MÉTODO DE ZIMMERMANN-WERNERS APLICADO NA OTIMIZAÇÃO DE
SISTEMAS DE MICROASPERSÃO EM TERRENOS COM DECLIVE**

**Botucatu
2019**

EVANIZE RODRIGUES CASTRO

**MÉTODO DE ZIMMERMANN-WERNERS APLICADO NA OTIMIZAÇÃO DE
SISTEMAS DE MICROASPERSÃO EM TERRENOS COM DECLIVE**

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp – Campus de Botucatu, para a obtenção do título de Mestre em Agronomia (Irrigação e Drenagem).

Orientador: Prof. Dr. Luís Roberto Almeida Gabriel Filho

Coorientador: Prof. Dr. João Carlos Cury Saad

Botucatu

2019

C355m Castro, Evanize Rodrigues
Método de Zimmermann-Werners aplicado na otimização de sistemas de microaspersão em terrenos com declive / Evanize Rodrigues Castro. -- , 2019
98 p. : il., tabs.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Farmacêuticas, Araraquara, Orientador: Luís Roberto Almeida Gabriel Filho
Coorientador: João Carlos Cury Saad

1. Irrigação. 2. Hidráulica. 3. Custo. 4. Modelos matemáticos. 5. Otimização matemática. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências Farmacêuticas, Araraquara. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

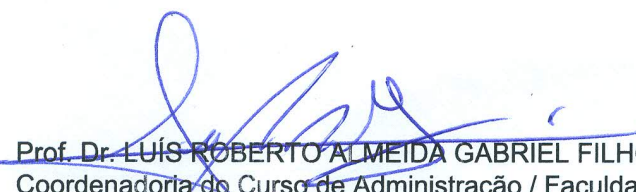
Título: **“MÉTODO DE ZIMMERMANN – VERNERS APLICADO NA OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS DE MICROASPERSÃO EM TERRENOS COM DECLIVE”**

AUTORA: EVANIZE RODRIGUES CASTRO

ORIENTADOR: LUÍS ROBERTO ALMEIDA GABRIEL FILHO

COORIENTADOR: JOÃO CARLOS CURY SAAD

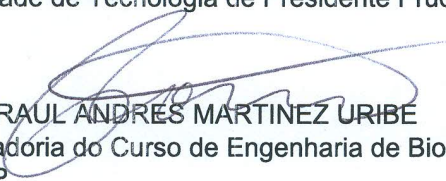
Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em AGRONOMIA (IRRIGAÇÃO E DRENAGEM), pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. LUÍS ROBERTO ALMEIDA GABRIEL FILHO

Coordenadoria do Curso de Administração / Faculdade de Ciências e Engenharia - FCE - UNESP - Tupã/SP


Prof. Dr. DANIEL DOS SANTOS VIAIS NETO

/ Faculdade de Tecnologia de Presidente Prudente


Prof. Dr. RAUL ANDRÉS MARTÍNEZ URIBE

Coordenadoria do Curso de Engenharia de Biossistemas / Faculdade de Ciências e Engenharia - FCE - UNESP - Tupã/SP

Botucatu, 19 de fevereiro de 2019.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por seu amor incondicional.

A mulher mais forte que tenho orgulho de chamar de mãe, Silvana Silva Rodrigues. Obrigada pelo seu amor, carinho, cuidado e por não medir esforços na conquista deste sonho.

Aos meus irmãos, Eduardo Tadeu Rodrigues Castro e Evandro Rodrigues Castro, minha cunhada Cássia Silva Matiolevitz e sobrinha Cecília Matiolevitz Castro, pelo amor, alegria e companheirismo.

Ao meu padrasto, Rubens José Soares, por todo suporte, amor e dedicação.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Luís Roberto de Almeida Gabriel Filho, por ter acreditado na minha capacidade quando não conseguia, pela oportunidade, a paciência e os ensinamentos.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. João Carlos Cury Saad, pela assistência e as contribuições nesta dissertação.

As professoras Dra. Camila Pires Cremasco Gabriel e Dra. Helenice de Oliveira Florentino Silva por todo suporte e aprendizado.

A Prof. Dra. Vanessa Avansini Botta pelo valioso aprendizado e incentivo a pesquisa durante minha graduação.

A Suziane Cayres pela amizade e por todas as instruções que ajudaram no meu amadurecimento pessoal e acadêmico.

A Taciana Neris, Daniel Santos e Steven Potts pela amizade e incentivo quando tudo parecia nublado.

A todas as amigas que o mestrado me proporcionou. Em especial, a Ana Cláudia Marassá, Flávia Mota, Bruno Costa, Tatiane Bortoletto, Fraciana Pereira, Renata Minhoni, Pedro Alcantara e as meninas da república que tive o prazer de conviver. Obrigada pelo carinho, as risadas e todos os momentos de descontração que foram fundamentais para a realização desta dissertação.

À Faculdade de Ciências Agronômicas da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” FCA/UNESP e ao Programa de Pós-graduação em Agronomia – Irrigação e Drenagem pela oportunidade do curso de mestrado.

O presente trabalho foi realizado com o apoio do CNPQ, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico-Brasil.

RESUMO

A otimização linear possibilita a obtenção de uma rede hidráulica de menor custo, dentre todas as alternativas viáveis de combinações de diâmetros e comprimentos. Um modelo apresentado na bibliografia minimiza o custo anual total de sistemas de microaspersão em áreas com desnível. Porém, a solução ótima deste modelo depende totalmente dos parâmetros de entrada, que podem conter uma certa imprecisão. A programação linear difusa é uma ferramenta que permite a incorporação dessas incertezas. Diante disso, o objetivo do trabalho é reformular o modelo de otimização de sistemas de microaspersão, possibilitando a aplicação de um método de otimização *fuzzy* nos coeficientes independentes imprecisos, para a determinar uma faixa de novas soluções de menores custos e que, também, atenda as restrições de área e hidráulica. Para isto, foram desenvolvidos dois capítulos e em ambos foram utilizados algoritmos criados no *software* MatLab para a resolução dos modelos. No primeiro capítulo é apresentado as alterações no modelo através de dois lemas que permitiram alcançar o propósito de determinar apenas as variáveis de decisão, sendo este modelo contendo cento e nove variáveis e duzentos e catorze restrições. E, para o mesmo conjunto de dados de aplicação do modelo original, esta modificação no modelo se mostrou eficaz e com custo total anual menor que o modelo original. Enquanto que no segundo capítulo, é exibido a aplicação dos método de Zimmermann-Werners no modelo modificado, obtendo sessenta modelos de programação linear *fuzzy* que encontram valores menores para a função objetivo do que o modelo original, sendo a maior diferença de custo de US\$ 809,91 ocorrendo no desnível de 3%. Portanto, os sessenta e um modelos criados são eficientes no dimensionamento de sistemas de microaspersão, apresentam a redução de custo anual total e são uma ferramenta para o projetista e produtor.

Palavras-chave: Modelo reestruturado. Variabilidade. Otimização linear *fuzzy*.

ABSTRACT

The linear optimization makes possible the obtaining of a hydraulic network of smaller cost, between all the viable alternatives of combinations of diameters and lengths. A model presented in the bibliography minimizes the total annual cost of microirrigation systems in sloping lands. However, the great solution of this model is totally depends on the input parameters, that can contain a certain imprecision. The diffuse linear programming is a tool that allows the incorporation of those uncertainties. Before that, the objective of the work is to reformulate the model of optimization of microirrigation systems, making possible the application of a fuzzy optimization method in the imprecise independent coefficients, for to determine of a range of new solutions of smaller costs and that, also, assist the constraints of area and hydraulics. For this, two chapters were developed and in both algorithms were used created in the MatLab software for the resolution of the models. In the first chapter it is presented the alterations in the model through two lemmas that allowed to reach the purpose of just determining the variables of decision, being this model containing hundred nine variables and two hundred and fourteen constraints. In addition, for the same group of data of application of the original model, this modification model if it showed effective and with annual total cost smaller than the original model. While in the second chapter, the application of the Zimmermann-Werners method is exhibited in the modified model, obtaining sixty models of fuzzy linear programming that find smaller values for the function objective than the original model, being the largest difference of cost of US\$ 809,91 happening in the slope of 3%. Therefore, the sixty and a models servants are efficient in the design of microirrigation systems, they present the reduction of total annual cost and they are a tool for the designer and producer.

Keywords: Model restructured. Variability. Fuzzy linear optimization

LISTA DE SÍMBOLOS

C	custo anual do sistema de irrigação (US\$)
N_s	número de unidade operacional
N_l	número de linhas laterais na unidade operacional
N_m	número de emissores por linha lateral
P_m	custo unitário do microaspersor (US\$/unidade)
L	comprimento da linha lateral com diâmetro unitário (m)
P_{pe}	preço do tubo de polietileno (US\$/ m)
P_v	custo unitário da válvula elétrica do início na unidade operacional (US\$/unidade)
C_{cp}	custo do painel de controle (US\$)
C_f	custo do sistemas de filtragem (US\$)
CRF	fator de recuperação do capital
PM_i	preço do tubo de PVC com diâmetro i usado na linha de derivação (US\$/ m)
$LM_{j,i}$	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 usado na linha secundária (US\$/ m)
$LS_{k,r}$	comprimento (m) da tubulação de PVC com diâmetro r na linha secundária k
PN_v	preço do tubo de PVC com diâmetro v usado na linha principal (US\$/ m)
$LN_{k,v}$	comprimento (m) da tubulação de PVC com diâmetro v na seção k da linha principal
Q_s	vazão na unidade operacional (m^3/s)
I_d	dias de irrigação no ciclo
I_h	horas de irrigação para o conjunto de unidades operacionais trabalhando simultaneamente
E	custo da energia elétrica (US\$/ kWh)
I_f	turno de irrigação (dias)
η	rendimento do conjunto motor e bomba
H_T	altura manométrica total (m)
S_L	espaçamento entre as linhas laterais (m)
S_k	comprimento da linha secundária (m)
N_k	comprimento da seção k da linha principal (m)
HM_o	carga hidráulica no início da linha de derivação (mca)
HM_j	carga hidráulica na saída j da linha de derivação (mca)
DM	perda de carga permitida na linha de derivação (mca)
HM_g	carga hidráulica na saída g da linha de derivação (mca)
HM_l	carga hidráulica na saída l da linha de derivação (mca)

H_{av}	carga hidráulica média na linha de derivação (<i>mca</i>)
h_w	carga hidráulica de operação do microaspersor (<i>mca</i>)
h_{f_l}	perda de carga na linha lateral (<i>mca</i>)
$JM_{j,i}$	gradiente de perda de carga (<i>m/m</i>) na tubulação de PVC com diâmetro <i>i</i> utilizado na seção <i>j</i> da linha de derivação
I	tipos de diâmetros na linha de derivação
J	número de trechos da linha de derivação
M	comprimento da linha de derivação (<i>m</i>)
dz	gradiente de declive (<i>m/m</i>)
H_{uo}	carga hidráulica na entrada da unidade operacional (<i>mca</i>)
H_v	perda de carga na válvula reguladora de pressão (<i>mca</i>)
H_o	carga hidráulica na entrada da linha principal (<i>mca</i>)
H_{es}	perda de carga na estação de controle (<i>mca</i>)
H_{su}	altura geométrica de sucção (<i>mca</i>)
H_k	carga hidráulica na saída <i>k</i> da linha principal (<i>mca</i>)
N	comprimento da linha principal (<i>m</i>)
$JN_{k,v}$	gradiente de perda de carga (<i>m/m</i>) no tubo com diâmetro <i>v</i> utilizado na seção <i>k</i> da linha principal
K	número de seções na linha principal
$JS_{k,r}$	gradiente de perda de carga (<i>m/m</i>) no tubo de PVC com diâmetro <i>r</i> utilizado na seção <i>k</i> da linha secundária
C_p	custo com sistema de bombeamento (US\$)
C_{PVC}	custo com tubulação de policloreto de vinila (US\$)
C_{pp}	custo anual com bombeamento (US\$)
CDN50	comprimento da tubulação com diâmetro nominal 50 <i>mm</i> (<i>m</i>)
CDN75	comprimento da tubulação com diâmetro nominal 75 <i>mm</i> (<i>m</i>)

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO GERAL.....	15
	CAPÍTULO 1 – REFORMULAÇÃO DE UM MODELO DE OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS DE MICROASPERSÃO EM TERRENOS COM DECLIVE.....	17
1.1	INTRODUÇÃO.....	18
1.2	MATERIAL E MÉTODOS.....	19
1.2.1	Modelo de otimização de sistemas de microaspersão em terrenos com declive.....	19
1.2.1.1	Dados de entrada para a aplicação do modelo de otimização.....	24
1.2.1.2	Dados de saída da aplicação do modelo de otimização.....	27
1.2.2	Passos para a reformulação do modelo.....	28
1.2.3	Resolução do modelo reformulado.....	29
1.3	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	29
1.3.1	Reformulação do modelo de otimização em sistemas de microaspersão.....	29
1.3.2	Dados de saída da validação do modelo reformulado.....	38
1.4	CONCLUSÃO.....	41
	REFERÊNCIAS.....	42
	CAPÍTULO 2 – APLICAÇÃO DO MÉTODO DE ZIMMERMANN-WERNERS EM UM MODELO DE OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS DE MICROASPERSÃO EM TERRENOS COM DECLIVE.....	45
2.1	INTRODUÇÃO.....	46
2.2	MATERIAL E MÉTODOS.....	47
2.2.1	Modelo de otimização de sistemas de microaspersão.....	47
2.2.2	Método de Zimmermann-Werners.....	51
2.2.3	Aplicação do método de Zimmermann-Werners.....	54
2.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	55
2.3.1	Resultados para os desníveis de 3% e 6%.....	55
2.3.2	Resultados para o desnível de 9%.....	62
2.4	CONCLUSÃO.....	63
	REFERÊNCIAS.....	64
	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	65
	REFERÊNCIAS.....	67
	APÊNDICE A – Algoritmo do modelo reformulado de otimização de sistemas de microaspersão em terrenos com declive.....	69
	APÊNDICE B – Determinação das metas.....	97
	APÊNDICE C – Método de Zimmermann-Werners.....	98

INTRODUÇÃO GERAL

A teoria dos conjuntos *fuzzy* foi proposta por Lofti A. Zadeh em 1965. Esta foi primeiramente desenvolvida “[...] para a solução de problemas imprecisos/vagos na área de inteligência artificial, especialmente para raciocínio impreciso e modelação de termos linguísticos.” (YOUNG-JOU; HWANG, 1992, p. 1, tradução nossa).

Este conceito foi implementado em programação matemática em 1970, quando Bellman e Zadeh introduziram o primeiro modelo *fuzzy* de tomada de decisão em que objetivos e restrições são representadas por conjuntos difusos (BELLMAN; ZADEH, 1970).

Segundo Young-Jou e Hwang (1992) alguns dos trabalhos pioneiros na resolução de problemas de tomada de decisão foram Tanaka, Okuda e Asai (1974) e Zimmermann (1976), logo após, houveram inúmeros modelos de programação linear *fuzzy*.

A programação linear difusa é uma ferramenta que permite a utilização de variabilidades no modelo de programação linear. Isto é, a incorporação de incertezas contidas nas restrições e função objetivo dando mais opções para o tomador de decisão (especialista).

Em suma, os métodos de programação linear difusa podem ser empregados quando os custos são imprecisos (DELGADO; VERDEGAY; VILA, 1990; LAI; HWANG, 1992), coeficientes tecnológicos são difusos (LAI; HWANG, 1992), restrições difusas (RAMIK; RIMANEK, 1985; CAMPOS; VERDEGAY, 1989), meta e as restrições são difusas (WERNERS, 1987; ZIMMERMANN, 1996) ou completamente difusos (CHANAS, 1983).

Kamakis, Georgiou e Papamichail (2014) utilizaram a programação linear *fuzzy* para análise e desempenho de uma rede de irrigação pressurizada operando sob demanda. Os resultados para o conjunto de dados analisados foram a “flexibilidade na adaptação de um futuro sistema de irrigação que requer maior pressão nos hidrantes” (KAMAKIS; GEORGIOU; PAPAMICHAIL, 2014, p. 457, tradução nossa).

Os autores também realizaram uma comparação no desempenho operacional da rede projetada com programação linear *fuzzy* e programação linear, obtendo que o primeiro método é melhor que o segundo. Isto ocorreu, principalmente, nos casos em que não foram selecionados previamente as pressões do hidrante no estágio de projeto e na acomodação de futuras tendências ou condições imposta pelo agricultor.

Já Revelli e Ridolfi (2007) usaram a otimização *fuzzy* na análise do comportamento hidráulico de redes de tubulações em parâmetros difusos, como, o coeficiente de rugosidade de tubulações antigas, que são difíceis de determinar à medida que envelhecem e variam com o número de usuários conectados à rede. Eles

encontraram por este método valores extremos para as cargas nodais e vazões de tubulações.

Desta forma, esta dissertação tem como objetivo geral determinar, utilizando o método de Zimmermann-Werners, novas soluções para um modelo reformulado de programação linear que minimiza o custo anual de um sistema de irrigação por microaspersão, de maneira que atenda as restrições e proporcione novas possibilidades para a decisão do projetista e produtor rural.

Já os objetivos específicos são:

(1) Reformular o modelo proposto por Saad e Mariño (2002) para que este determine apenas as variáveis de decisão.

(2) Validar o modelo reformulado através do *software* MatLab e comparar com os resultados do modelo original.

(3) Aplicar o método de Zimmermann-Werners no modelo reformulado para a obtenção de novas soluções, inclusive menores custos anuais, para a decisão do projetista e produtor rural.

(4) Analisar os resultados obtidos em **(3)** e determinar, dentre os custos do sistema de irrigação, qual interfere mais em sua diminuição.

Para atingir estes propósitos, foram desenvolvidos dois capítulos nesta dissertação, sendo o primeiro intitulado “Reformulação de um modelo de otimização de sistemas de microaspersão em terrenos com declive”, que apresenta as modificações em um modelo de otimização linear com a finalidade de determinar apenas as variáveis de decisão. E o segundo capítulo intitulado “Aplicação do método de Zimmermann-Werners em um modelo de otimização de sistemas de microaspersão em terrenos com declive”, mostrando os resultados da aplicação deste método no modelo alterado.

sistema de irrigação de US\$ 43,91, US\$ 44,38 e US\$ 47,04 para 3%, 6% e 9%, respectivamente.

1.4 CONCLUSÃO

Os resultados da aplicação do modelo reformulado são iguais aos obtidos por Saad e Mariño (2002), na carga hidráulica média da linha de derivação e comprimentos, em função dos seus respectivos diâmetros, das tubulações em todo o sistema de irrigação e para todos os desníveis.

Em relação ao decréscimo do custo anual do sistema de irrigação, é possível afirmar que este ocorre, principalmente, devido ao custo anual do bombeamento que depende da variável altura manométrica, no qual também sofre uma pequena diminuição em relação a Saad e Mariño (2002).

Portanto, o novo modelo mostra ser tão eficiente quanto o modelo original, determinando apenas o comprimento, em função do seu respectivo diâmetro, das tubulações do sistema de irrigação, a altura manométrica e a carga hidráulica média na linha de derivação.

REFERÊNCIAS

BENAMI, A.; OFEN, A. Irrigation engineering. 2. ed. Haifa: **Irrigation Engineering Scientific Publications**, 1984. 257p.

BHAVE, P. R. Selecting pipe sizes in network optimization by L. P. **Journal of the Hydraulics Division**, New York, v. 105, n. 7, p. 1019-1025, 1978.

CARVALHO, D. F.; SOARES, A. A.; RIBEIRO, C. A. A. S.; SEDIYAMA, G. C.; PRUSKI, F. F. Otimização no uso da água no perímetro irrigado do Gorutuba, utilizando-se a técnica da programação linear. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v. 4, n. 2, p. 203-209, 2000.

CASE, K. E.; WHITE, J. A. A linear programming formulation of a water supply problem. **Transactions of the American Institute of Industrial Engineers**, v. 4, n. 2, p. 85-91, 1972.

CRÓCOLI, O. **Programação Linear: Uma abordagem para o Ensino Médio**. 2016. 40 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Matemática em Rede Nacional) - Universidade Estadual de Maringá, Maringá.

FRIZZONE, J. A.; BOTREL, J. A. A.; ARCE, R. A. B.; PERES, F. C. Alocação de água e combinação de atividades pela programação linear em um projeto hidroagrícola no município de Guaíra (SP). **Scientia Agrícola**, Piracicaba, SP, v. 51, n. 3, p. 524-532, set./dez. 1994.

GUPTA, I.; HASSAN, M. Z.; COOK, J. Linear programming analysis of a water supply system with multiple supply points. **Transactions of the American Institute of Industrial Engineers**, v. 4, n. 3, p. 200-204, 1972.

KARMELI, D.; GADISH, Y.; MEYERS, S. Designer of optimal water distribution networks. **Journal of the Pipeline Division**, New York, v.94, n.1, p.1-10, 1968.

MARCUZZO, F. F. N. **Sistemas de otimização hidráulica e econômica de rede de irrigação localizada usando algoritmos genéticos**. 2008. 361 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

ORON, G.; KARMELI, D. Solid set irrigation system design using linear programming. **Water resources Bulletin**, Urbana, v. 17, n. 4, p. 565-570, aug. 1981.

PARDOSSI, A.; INCROCCI, L.; INCROCCI, G.; MALORGIO, F.; BATTISTA, P.; BACCI, L.; RAPI, B.; MARZIALETTI, P.; HEMMING, J.; BALENDONCK, J. Root zone sensors for irrigation management in intensive agriculture. **Sensors**, v. 9, p. 2809-2835, 2009

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

Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2002.

SAAD, J. C. C.; MARIÑO, M. A. Optimum Designer of Microirrigation Systems in Sloping Lands. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Reston, v. 128, n. 2, p. 116-124, 2002.

SAAD, J. C. C.; MARIÑO, M. A. Designer of microirrigation systems in sloping land using linear programming. **Irriga**, Botucatu, v. 7, n. 3, p. 214-225, 2003.

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

SANTOS JÚNIOR, J. L. C.; 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**, Campina Grande, PB, v. 19, n. 7, p. 621-629, 2015.

SANTOS, M. A. L.; COSTA, R. N. T.; FRIZZONE, J. A.; SANTOS, C. G.; SANTOS, V. R. Modelo de programação linear para otimização econômica do projeto de irrigação Baixo Acaraú-CE. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 22, n. 1, p. 6-19, jan./mar. 2009.

WU, I. P. et al. Design principles: system design. In: NAKAYAMA, F. S.; BUCKS, D. A. **Trickle irrigation for crop production**, Amsterdam: Elsevier, 1986. p. 53-92.

Tabela 4 - Comprimento (m) das tubulações com diâmetros nominal de 100 mm e 125 mm , em toda a porcentagem (%) das tolerâncias, na seção 3 da linha principal com o desnível de 9%

Porcentagem (%)	Diâmetro nominal (mm)	
	100	125
1	88,277	9,723
2	62,04	35,96
3	36,935	61,065
4	12,075	85,925
5-30	0	98

2.4 CONCLUSÃO

Pelo método de otimização linear *fuzzy* é possível reduzir o custo anual do sistema de irrigação em todos modelos *fuzzy* construídos, sem alterar a carga hidráulica média na linha de derivação e a altura manométrica total. Sendo as maiores reduções desse custo de US\$ 40,55 para o desnível de 3% e US\$ 43,16 para a declividade de 6%.

Também é notado uma relação entre o custo anual do sistema de irrigação e o custo com tubulação de policloreto de vinila, que diminui com o aumento do comprimento da tubulação com diâmetro nominal de 50 mm nas seções 1, 2 e 3 da linha secundária nos desníveis de 3% e 6%.

A aplicação do método de Zimmermann-Werners não é possível no desnível 9%, devido a incoerência no dimensionamento da linha principal seção 3. Com isso, fica para investigações futuras o desnível limite que possibilita a utilização do método de Zimmermann-Werners e qual restrição garantiria o uso deste na declividade de 9%.

REFERÊNCIAS

- BENAMI, A.; OFEN, A. Irrigation engineering. 2. ed. Haifa: **Irrigation Engineering Scientific Publications**, 1984. 257p.
- BELLMAN, R.; ZADEH, L. A. Decision-making in a fuzzy environment. **Management Science**, v. 17, p. 141-164, 1970.
- CANTÃO, L. A. P.; SARTORI, M. M. P.; CANTÃO, R. F. Programação matemática fuzzy aplicada ao problema de minimização de resíduos da colheita de cana-de-açúcar. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 37., 2005, Gramado. **Anais...** Gramado: UFSM, 2005. p. 2029-2035.
- LANZER, E. A. **Programação Linear**: conceitos e aplicações. 2. ed. Rio de Janeiro: IPES/INPES, 1988. 270p.
- ORON, G.; KARMELI, D. Solid set irrigation system design using linear programming. **Water resources Bulletin**, Urbana, v. 17, n. 4, p. 565-570, aug. 1981.
- SAAD, J. C. C.; TOMAZELA, C.; PERES, J. A.; PERES, F. C.; FRIZZONE, J. A. Otimização da rede hidráulica de um sistema de irrigação por gotejamento utilizando programação linear. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 29, n. 5, p. 797-805, 1994.
- SAAD, J. C. C.; MARIÑO, M. A. Optimum Designer of Microirrigation Systems in Sloping Lands. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Reston, v. 128, n. 2, p. 116-124, 2002.
- SILVA, L. P.; SILVA, M. M.; CORREA, M. M.; SOUZA, F. C. D.; SILVA, E. F. F. Desempenho de gotejadores autocompensantes com diferentes efluentes de esgoto doméstico. **Revista Brasileira de engenharia agrícola e ambiental**, v. 16, n. 5, p. 480-486, 2012.
- ZIMMERMANN, H.-J. **Fuzzy set theory**: its applications. 3. ed. Kluwer Academic Publishers, 1996. 435 p

REFERÊNCIAS

- BELLMAN, R.; ZADEH, L. A. Decision-making in a fuzzy environment. **Management Science**, v. 17, p. 141-164, 1970.
- CAMPOS, L.; VERDEGAY, J. L. Linear programming problems and ranking of fuzzy numbers. **Fuzzy Sets and Systems**, v. 32, p. 1-11, 1989.
- CHANAS, S. The use of parametric programming in fuzzy linear programming. **Fuzzy Sets and Systems**, v.11, p. 243-251, 1983.
- DELGADO, M.; VERDEGAY, J. L.; VILA, A. Relating diferente approaches to solve linear programing problems with imprecise costs. **Fuzzy Sets and Systems**, v. 37, p. 32-42, 1990.
- REVELLI, R.; RIDOLFI, L. Fuzzy approach for analysis of pipe networks. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 1284, p. 93-101, 2002.
- KAMAKIS, P.; GEORGIU, P. E.; PAPAMICHAIL, D. M. Performance analysis of on-demand pressurized irrigation network designer with linear and fuzzy linear programming. **Irrigation and Drainage**, v. 63, p. 451-462, 2014.
- LAI, Y. J.; HWANG, C. L. A new approach to some possibilistic linear programming problems. **Fuzzy Sets and Systems**, v. 49, p. 121-133, 1992.
- RAMIK, J.; RIMANEK, J. Inequality relation between fuzzy numbers and its use in fuzzy optimization. **Fuzzy Sets and Systems**, v. 16, p. 123-138, 1985.
- SAAD, J.C.C.; MARIÑO, M. A. Optimum Designer of Microirrigation Systems in Sloping Lands. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Reston, v. 128, n. 2, p. 116-124, 2002.
- TANAKA, H.; OKUDA, T.; ASAI, K. On fuzzy mathematical programming. **Journal of Cybernetics**, v. 3, p. 37-46, 1974.
- WERNERS, B. An interactive fuzzy programmimng system. **Fuzzy Sets and Systems**, v. 23, p. 131-147, 1987.
- YOUNG-JOU, L.; HWANG, C. L. **Fuzzy mathematical programming: methods and applications**. 1. ed. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1992. 394. v. 306. p.
- ZIMMERMANN, H.-J. Description and optimization of fuzzy systems. **International Journal of Genereal Systems**, v. 2, p. 209-215, 1976.
- ZIMMERMANN, H.-J. **Fuzzy set theory: its applications**. 3. ed. Kluwer Academic Publishers, 1996. 435 p