

OTIMIZAÇÃO ECONÔMICA DA FASE DE REPOSIÇÃO EM IRRIGAÇÃO POR SULCOS

KELTE RESENDE ARANTES¹, TADEU MIRANDA DE QUEIROZ², ROGÉRIO PEREIRA DA
SILVA AIROLDI³, JOSÉ ANTÔNIO FRIZZONE⁴ E TARLEI ARRIEL BOTREL⁴

Recebido em 30.08.2010 e aceito em 29.03.2011

¹ Doutor – Instituto de Ciências Agrárias e Ambientais, Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT), Campus de Sinop, Av. Alexandre Ferronato 1200, Setor industrial, Sinop, MT, CEP 78.550-000, *Autor pra correspondência, e-mail: kelte@ufmt.br

² Doutor - Departamento de Engenharia de Produção Agroindustrial, Universidade do Estado de Mato Grosso (UNEMAT), Barra do Bugres, MT, CEP 78.390-000, e-mail: tdmqueiroz@yahoo.com.br

³ Doutor – IEABAST, Petróleo Brasileiro s.a. (PETROBRÁS). Bacabal, 40, apto 41, bloco 01. Parque Industrial, São José dos Campos, SP, CEP 12235-680, e-mail: airoldi@petrobras.com.br

⁴ Doutor - Departamento de Engenharia Rural, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ/USP), Avenida Pádua Dias 11, Cx. Postal 9. CEP 13.418-900, e-mail: frizzone@esal.usp.br, tabotrel@esal.usp.br.

RESUMO: Com este trabalho objetivou-se o desenvolvimento de uma metodologia para o dimensionamento econômico da fase de reposição em irrigação por sulcos com drenagem livre. A partir da metodologia proposta desenvolveu-se um software em linguagem Delphi 3.0, para auxiliar a tomada de decisão na fase de dimensionamento de projetos de irrigação por sulcos, considerando-se os custos operacionais envolvidos, o preço do produto e as particularidades físicas do solo e topografia da área. O software apresenta os resultados na forma de quadros e gráficos diversos. Em simulações hipotéticas para a cultura do feijão e se considerando dois tipos de solo, os resultados mostraram que a rentabilidade econômica do projeto é fortemente limitada pelas baixas eficiências de aplicação da água e altas perdas por escoamento, inerentes aos sistemas de irrigação por sulcos sem redução de vazão ou sistema de reúso da água.

Termos para indexação: maximização, eficiência econômica, irrigação por superfície

ECONOMICAL OPTIMIZATION OF THE REPLACEMENT PHASE IN FURROW IRRIGATION

ABSTRACT: This study aimed to develop a methodology for the economical design of the replacement phase in furrow irrigation with free drainage. Software was developed in language Delphi 3.0 to help the decision taken in the design step of irrigation furrow systems, considering the operational cost involved, the price of the product as well as the physical particularities of the soil and topography of the area. The software presents the results in the form of tables and graphs. In hypothetical simulations of beans crop in two soil types, the results showed that the economical profit of the project is strongly limited by the low water application efficiency and by high losses runoff present in furrows irrigations system without cutback flow reduction or water reuse system.

Index terms: maximization, economical efficiency, surface irrigation

INTRODUÇÃO

A agricultura irrigada apresenta amplos benefícios que só podem ser alcançados em toda sua plenitude, quando o sistema de irrigação for dimensionado e manejado com critérios que resultem em aplicações de água em quantidades compatíveis com as necessidades de consumo das culturas irrigadas (Carvalho et al., 2001).

O excesso e a falta de água são fatores que afetam, de maneira marcante, o rendimento das lavouras irrigadas e, conseqüentemente, o retorno econômico desse sistema de produção (Saad & Libardi, 1994).

A área total irrigada no Brasil, em 2006, era de 4.463.691 hectares, dos quais 1.342.490 hectares irrigados por superfície (IBGE, 2009).

Segundo Mohamed et al. (2010), os projetos de irrigação por superfície, são responsáveis por quase todas as áreas de terras irrigadas do mundo, sendo seu baixo desempenho, objeto de estudo de muitos pesquisadores e. Segundo os mesmos autores a maioria desses projetos são construídos e operados sem o uso de técnicas adequadas, com conseqüente baixa uniformidade e eficiência de aplicação de água.

Normalmente, os sistemas de irrigação por sulcos apresentam baixa eficiência de aplicação da água, em torno de 45%, conforme constatado por Smith et. al (2005). Desta forma, tornam-se necessárias estratégias de manejo da irrigação que permitam reduzir a quantidade de água aplicada, maximizando a eficiência de utilização deste recurso e conseqüente aumento da lucratividade, principalmente nas regiões em que a água é escassa.

Segundo Frizzzone (1992), maximizar a eficiência da irrigação nem sempre significa otimizar o lucro, pois o aumento dos custos da irrigação está associado ao aumento na uniformidade da irrigação. Desta maneira, os benefícios econômicos obtidos com a elevação da eficiência de irrigação devem ser comparados com os custos associados, visando-se sempre a máxima rentabilidade líquida. Duarte & Silva (2002) afirmam que o dimensionamento econômico vem sendo cada vez mais empregado no Brasil, principalmente após a estabilização da moeda nacional.

No Brasil, o feijão é cultivado principalmente por pequenos produtores, constituindo-se um dos alimentos básicos para a sua população. No seu cultivo são empregados baixos níveis tecnológicos, apresentando caráter de subsistência.

No ano de 2006, o país possuía uma área de 47.200.000 hectares a ser colhida, sendo 9,46% desse total (4.468.807 hectares) cultivada com feijão (IBGE, 2009), dos quais 8,35% (373.145 hectares) utilizam algum sistema de irrigação. Segundo a mesma fonte, a produção total de feijão na safra de 2006 foi de 3.108.983 toneladas, dos quais 524.019 toneladas foram oriundas de áreas irrigadas, o que equivale a 16,85% da produção total. A partir desses dados pode-se observar a grande importância da cultura do feijão no cenário socioeconômico nacional, bem como do uso da irrigação no aumento significativo de produtividade desta cultura.

Através deste trabalho, objetivou-se o desenvolvimento de uma metodologia e de um "software" para o dimensionamento econômico da fase de reposição na irrigação por sulcos. Finalizadas estas etapas, buscou-se simular o dimensionamento de um projeto de irrigação para a cultura do feijão.

MATERIAL E MÉTODOS

O modelo matemático desenvolvido para determinação do tempo de reposição otimizado, como função da máxima receita líquida, foi programado na linguagem Delphi 3.0, com o objetivo de facilitar o processamento dos dados criando-se, assim, um “software” denominado ‘Planeja-Sulcos’. A partir da entrada de parâmetros relativos ao solo, às dimensões da área a ser irrigada, à cultura e aos custos gerais, este software calcula diversos parâmetros de projeto, tais como: dimensionamento hidráulico da adutora e sistema de bombeamento de água para irrigação, canais de derivação e drenagem, sifões, divisão da área em unidades e subunidades, determinação do turno de rega, da lâmina requerida pela cultura, das lâminas para máxima produtividade e máxima receita líquida, a qual está diretamente relacionada com a duração da fase de reposição, entre outros.

Apresentar-se-ão, a seguir, as equações que compõem o modelo, as quais são utilizadas para a obtenção do tempo ótimo da fase de reposição que permitirá ao produtor irrigante, obter a máxima receita líquida para as condições particulares do solo, cultura, topografia e dimensões da área de cultivo.

O processo de cálculo se inicia pela determinação da lâmina requerida pela cultura (hr) através da seguinte equação:

$$hr = \frac{(\theta_{cc} - \theta_{pmp})}{10} \cdot z \cdot f \quad (1)$$

em que:

hr – lâmina requerida pela cultura, mm

θ_{cc} – umidade na capacidade de campo, $m^3 m^{-3}$

θ_{pmp} – umidade no ponto de murcha permanente, $m^3 m^{-3}$

z – profundidade efetiva do sistema radicular, cm

f – fator de disponibilidade de água da cultura para todo o ciclo, adimensional

Calcula-se, a seguir, o intervalo entre irrigações (IR) para o projeto.

$$IR = \frac{hr}{Etm} \quad (2)$$

em que:

IR – intervalo entre irrigações, dias

Etm – evapotranspiração potencial diária da cultura, $mm dia^{-1}$

O período de irrigação (PI) foi estabelecido como sendo:

$$PI = IR - 1 \quad (3)$$

em que:

PI – período de irrigação, dias

O tempo de reposição para infiltrar a lâmina requerida (hr) é calculado a partir do modelo de Kostiakov – Lewis (Equação 4) aplicando-se o Método Numérico de Newton –Rahpson.

$$Yr = \beta.T^\alpha + f_0.T \quad (4)$$

em que:

Yr – lâmina infiltrada, mm

T – Tempo para infiltrar a lâmina Yr , min

β - coeficiente, $\text{mm min}^{-\alpha}$

α - coeficiente, adimensional

f_0 – velocidade de infiltração básica, mm min^{-1}

O tempo de avanço (Ta) é determinado a partir do tempo de reposição (Tr). Desta maneira, o tempo de avanço é limitado por uma fração do tempo de reposição; comumente, adota-se $Ta = 0,25.Tr$, mas esta fração pode ser determinada pelo usuário. Determinado o tempo de avanço, calcula-se o comprimento preliminar do sulco.

$$Lp = \left(\frac{Ta}{k} \right)^{\left(\frac{1}{b} \right)} \quad (5)$$

em que:

Lp – comprimento preliminar do sulco, m

Ta – tempo de avanço, min

k – coeficiente da equação de avanço, min m^{-b}

b – coeficiente da equação de avanço, adimensional

O tempo de corte da irrigação (Tc) é obtido pela soma do tempo de avanço e tempo de reposição.

$$Tc = Ta + Tr \quad (6)$$

A área a ser irrigada por sulcos deverá ser, obrigatoriamente, retangular. Desta forma, possui duas dimensões que, multiplicadas, resultam na área total (em hectares). Uma dessas dimensões, “ La ”, deverá ser aquela que possui a declividade no sentido em que os sulcos serão dispostos; assim, a dimensão “ La ” deverá ser um múltiplo do comprimento real dos sulcos, somado a um comprimento “ Lc ” destinado à construção dos canais de distribuição e drenagem da água em cada unidade; portanto, o novo comprimento do sulco (Ls) é calculado conforme o procedimento a seguir:

$$Na = \frac{La}{(Lp + Lc)} \quad (7)$$

em que:

Na – número inteiro que determina a quantidade de unidades de irrigação da área

La – dimensão da área no sentido da declividade do sulco, m

Lc – largura a ser destinada para a construção dos canais de derivação e drenagem, m

$$DL = \frac{La - Na.(Lp + Lc)}{Na} \quad (8)$$

em que:

DL – diferencial da área que deverá ser acrescida ao Lp para aproveitamento da área total do projeto, m

$$Ls = Lp + DL \quad (9)$$

em que:

Ls – comprimento real do sulco, m

Determinado o comprimento real do sulco, recalcula-se o tempo de avanço e de corte para o projeto (Equações 5 e 6), na condição de irrigação sem déficit.

Dividida a área em “ Na ” unidades, pode-se determinar o número total de sulcos (Ns) do projeto.

$$Ns = \frac{Lb.Na}{E} \quad (10)$$

em que:

Lb – dimensão da área no sentido contrário à declividade do sulco, m

E – espaçamento entre sulcos, m

O número total de parcelas (NTp) do projeto será função do período de irrigação, tempo de corte e jornada de trabalho diária.

$$NTp = PI \cdot \left(\frac{Jt}{Tc} \right) \quad (11)$$

em que:

Jt – jornada de trabalho diária, h

Tc – tempo de corte, h

O número de parcelas a ser irrigadas por dia (Npd) será:

$$Npd = \frac{NTp}{PI} \quad (12)$$

Após a obtenção do número total de parcelas, determina-se o número de divisões (Nb) na dimensão “ Lb ” do projeto para que o produto entre “ Na ” e “ Nb ” seja igual ao número total de parcelas.

$$Nb = \frac{Ntp}{Na} \quad (13)$$

Caso o produto entre o número de parcelas a serem irrigadas por dia e o período de irrigação resulte em um valor inferior ao número total de parcelas irrigadas, devido a problemas de arredondamento inerentes ao processo de cálculo desses parâmetros, deve-se determinar, então, o número de parcelas a serem irrigadas além do período da jornada de trabalho. Esta quantidade

adicional de áreas (N_{pex}) deve ser irrigada dentro de cada período de irrigação e é determinada pela seguinte equação.

$$N_{pex} = NTp - (Pi.Npd) \quad (14)$$

Para irrigar esta quantidade de parcelas extras, calcular-se-ão as horas extras necessárias (Hex):

$$Hex = N_{pex}.Tc \quad (15)$$

A área total e de cada parcela do projeto, é calculada a partir das seguintes equações:

$$At = \frac{(La.Lb)}{10000} \quad (16)$$

em que:

At – área total do projeto, ha

$$Ap = \frac{At}{(NTp)} \quad (17)$$

em que:

Ap – área da parcela, ha

Dividida a área, calcula-se o número de sulcos por parcela (Nsp) e a vazão a ser fornecida pelo sistema de bombeamento.

$$Nsp = \frac{Lb}{(Nb.E)} \quad (18)$$

$$Q_{sist} = \frac{Nsp.qe}{10.Ed} \quad (19)$$

em que:

Q_{sist} – vazão do sistema de bombeamento, $m^3 s^{-1}$

qe – vazão derivada ao sulco, $L s^{-1}$

Ed – eficiência de distribuição, %

Pela equação da continuidade, e se conhecendo o valor do diâmetro da adutora, calcula-se o valor da velocidade de escoamento.

$$V = \frac{4Q_{sist}}{\pi.D^2} \quad (20)$$

em que:

V – velocidade de escoamento na adutora, $m s^{-1}$

D – diâmetro da tubulação adutora, m

A perda de carga total do sistema de adução é calculada a partir da equação de Hazen-Williams, admitindo-se que a perda de carga localizada é aproximadamente 5% deste valor.

$$H_f = 10,65 \cdot \frac{L}{D^{4,87}} \left(\frac{Q_{sist}}{C} \right)^{1,852} \cdot 1,05 \quad (21)$$

em que:

H_f – perda de carga total do sistema (m);

L – comprimento total da adutora (m);

C – coeficiente de Hazen – Williams (adimensional).

A altura manométrica total é calculada por:

$$H_{man} = H_f + H_g \quad (22)$$

em que:

H_{man} – altura manométrica total do sistema, m

H_g – altura geométrica total (altura da sucção + altura do recalque), m

A potência hidráulica do sistema é calculada pela seguinte equação:

$$P = \frac{\gamma \cdot H_{man} \cdot Q_{sist}}{\eta} \quad (23)$$

em que:

P – potência hidráulica do sistema, W

γ – peso específico da água, $N\ m^{-3}$

η – rendimento do sistema motobomba (decimal; $0 \leq \eta \leq 1$).

A potência hidráulica do sistema é transformada para a unidade de cavalo vapor para, em seguida, ser utilizada no cálculo da potência do motor elétrico; esta última, por sua vez, é calculada como sendo a potência hidráulica multiplicada por um fator de reserva de potência; em seguida, procura-se o valor mais próximo de um valor de potência comercial, superior à potência calculada no passo anterior. Calcula-se, ainda, a relação entre a potência do motor elétrico e a área total irrigada ($cv\ ha^{-1}$).

Os custos independentes, ou custos fixos, somados ao custo da água consumida na irrigação, geram os custos totais.

$$CT = C_o + C_w \cdot Wa \cdot fi \quad (24)$$

em que:

CT – custo total, $R\$ ha^{-1}$

C_o – custos independentes, $R\$ ha^{-1}$

C_w – custos da água, $R\$ ha^{-1}\ mm^{-1}$

Wa – lâmina d'água aplicada no ciclo de irrigação, mm

fi – fração da lâmina consumida em todo o ciclo, fornecida pela irrigação

O coeficiente C_w é calculado a partir da soma de dois outros coeficientes denominados K_1 e K_2 , os quais são determinados a partir das seguintes equações:

$$K_1 = 10.Ca \quad (25)$$

em que:

K_1 – coeficiente de custo da água, R\$ ha⁻¹ mm⁻¹

Ca – custo da água, R\$ m³

$$K_2 = \frac{P.Tc.C_E}{hr.Ap} \quad (26)$$

em que:

K_2 – coeficiente de custo da água, R\$ ha⁻¹ mm⁻¹

P – potência do motor elétrico do sistema, kW

Tc – tempo de corte, h

C_E – custo da energia, R\$ kW⁻¹ h⁻¹

hr – lâmina requerida em uma irrigação, mm

Ap – área da parcela, ha

A função de produção utilizada é dada pelo modelo quadrático. Dispondo-se dos seus coeficientes a , b e c , pode-se utilizar o modelo para qualquer cultura de interesse.

$$F(W) = a.W^2 + b.W + c \quad (27)$$

em que:

$F(W)$ – produtividade, kg ha⁻¹

W – lâmina d'água armazenada no ciclo de produção, mm

A renda líquida da produção é calculada por:

$$RL = F(W).Pp - (C_o + C_w.W.fi) \quad (28)$$

em que:

RL – renda líquida da produção, R\$ ha⁻¹

Pp – preço do produto, R\$ kg⁻¹

Calcula-se, em seguida, o número de irrigações esperadas para todo o ciclo da cultura.

$$k_N = \frac{DC}{IR} \quad (29)$$

em que:

k_N – número de irrigações esperadas durante todo o ciclo da cultura

DC – duração do ciclo da cultura, dias

IR – Intervalo entre irrigação, dias

O processo de cálculo da rentabilidade máxima faz variar o tempo de reposição (de minuto em minuto), desde 1 min, até o tempo de reposição máximo (anteriormente calculado para irrigação sem déficit). Para cada tempo de corte fixado calculou-se o tempo de oportunidade de infiltração, metro a metro, desde o início até o final do sulco, conforme a equação a seguir:

$$Top_{ij} = (Ta_{TOT} + Tr_j) - k.L_i^b \quad (30)$$

em que:

Top_{ij} – j-ésimo tempo de oportunidade de infiltração da água para o j-ésimo tempo de reposição, para cada i-ésimo comprimento, min

Ta_{TOT} – tempo de avanço máximo, calculado para o comprimento L_s do sulco, min

Tr_j – j-ésimo tempo de reposição, min

k e b – coeficientes de ajuste da equação de avanço

L_i – i-ésimo comprimento do sulco, m

Para cada j-ésimo tempo de reposição fixado e para cada i-ésimo comprimento do sulco, calcula-se a lâmina infiltrada (Equação 4), a produtividade obtida (Equação 27) e a receita líquida (Equação 28); em seguida, a receita líquida foi integrada para todo o comprimento do sulco, em cada j-ésimo tempo de reposição.

$$RL_{jL} = \frac{\sum_{i=0}^L (Pp.(a.(W_i + W_{ch})^2 + b.(W_i + W_{ch}) + c) - CT_i)}{L} \quad (31)$$

em que:

RL_{jL} – j-ésima receita líquida da produção associada ao j-ésimo tempo de reposição para todo o comprimento do sulco, R\$ ha⁻¹

Pp – preço do produto, R\$ kg⁻¹

W_i – i-ésima lâmina infiltrada no i-ésimo comprimento do sulco (mm);

W_{ch} – lâmina infiltrada advinda da chuva, mm

CT_i – i-ésimo custo total calculado para o i-ésimo comprimento do sulco, R\$ ha⁻¹

As lâminas d'água fornecidas pela chuva e irrigação para todo o ciclo da cultura, são determinadas por:

$$W_{ch} = hr.ky.(1 - f_i) \quad (32)$$

$$W_i = (Yr.ky).f_i \quad (33)$$

O modelo prevê que uma parcela da água pode ser proveniente da chuva e o restante deverá ser aplicado pela irrigação. Esta divisão é considerada no cálculo da receita líquida a partir da seguinte equação:

$$Wap = k_N \cdot \left(\frac{qe \cdot 60 \cdot Tc}{E \cdot Ls} \right) \quad (34)$$

em que:

Wap – lâmina aplicada para todo o ciclo da cultura, mm

Tc – tempo de corte, min

Finalmente busca-se o valor do tempo de reposição que leva à máxima receita líquida. Determinado o tempo de reposição ótimo e possuindo o perfil de infiltração ao longo do sulco, determina-se a lâmina infiltrada média que corresponde à lâmina ótima de irrigação. A lâmina considerada para o cálculo dos custos totais é a lâmina total aplicada no processo de irrigação (" Wap ").

Para o tempo de reposição ótimo calculado, determina-se o perfil de infiltração da água ao longo do comprimento do sulco, de forma a se encontrar a posição onde ocorre a infiltração da lâmina ótima econômica e da lâmina requerida pela cultura. A posição desta última (Xr) é utilizada na determinação da área de déficit.

$$A_{DEF} = \left(1 - \frac{(Ls - Xr)}{Ls} \right) \cdot 100 \quad (35)$$

em que:

A_{DEF} – área de déficit, %

Xr – posição no sulco onde é infiltrada a lâmina requerida pela cultura, m

Além dos parâmetros descritos anteriormente, calculam-se as eficiências de aplicação da água e de armazenamento, e as perdas por escoamento e percolação.

Um fluxograma do aplicativo 'Planeja-Sulcos', desenvolvido a partir do modelo proposto, é apresentado na Figura 1.

Para validação da modelagem matemática apresentada, utilizou-se a função de produção para a cultura do feijão determinada por Figuerêdo et al. (1998):

$$P = -0,00849.W^2 + 10,187.W - 624,123 \quad (36)$$

Para uma situação hipotética variaram-se os seguintes parâmetros: fração da água fornecida pela irrigação (75 e 100%), custo da energia elétrica (0,179 R\$ kW⁻¹ h⁻¹ e zero) e custo da água (0,01 R\$ m⁻³ e zero). Os diferentes cenários obtidos pela variação desses parâmetros foram aplicados para dois tipos de solo, um de textura argilos, denominado de solo "A" e outro de textura média, denominado de solo "B", cujas equações foram obtidas de Olitta (1984) e Garrido et al. (1994), respectivamente. As equações de infiltração e avanço e os valores de umidade na capacidade de campo e no ponto de murcha permanente, destes solos são apresentados na Tabela 1.

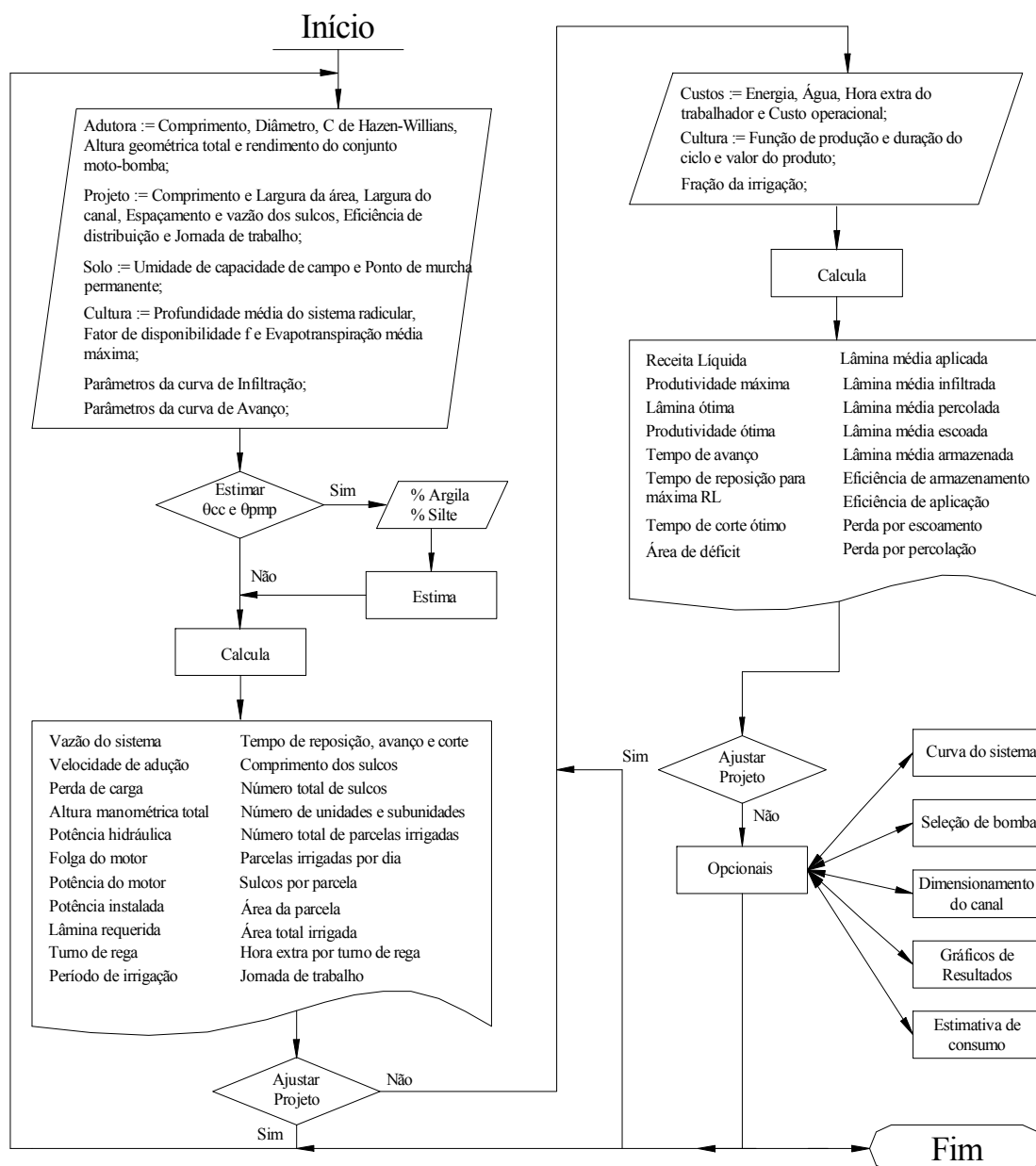


FIGURA 1. Fluxograma do aplicativo 'Planeja-Sulcos'.

Para a área e a cultura a ser irrigada, consideraram-se as seguintes características:

Dimensões da área: 450 x 450 m, ou 20, 25 ha

Espaçamento entre sulcos: 0,75 m

Vazão derivada ao sulco: $1,0 \text{ L s}^{-1}$

Profundidade média do sistema radicular: 0,40 m

Fator de disponibilidade de água à cultura para todo o ciclo: 0,50

Evapotranspiração potencial máxima média para todo o ciclo: 4,0 mm dia⁻¹

Comprimento total da tubulação adutora: 500 m

Coefficiente de Hazen-Willians (C): 125

Desnível geométrico total: 15 m

Rendimento do conjunto motobomba: 70%

Relação entre o tempo de avanço e o tempo de reposição: 1/3

Custos independentes da produção do feijão: 2191,27 R\$ ha⁻¹

Preço do feijão: 1,25 R\$ kg⁻¹ (ou R\$ 75,00 por saca de 60 kg)

TABELA 1. Dados dos solos A e B utilizados nas simulações

Solo	Equação de Avanço	Equação de Infiltração acumulada	θ_{CC} (cm ³ cm ⁻³)	θ_{PMP} (cm ³ cm ⁻³)	Textura do solo
A	$Ta = 0,0011 * X^{2,147}$	$Y = 0,88 * T^{0,68}$	37,1	22,1	Argilosa
B	$Ta = 0,1218 * X^{1,451}$	$Y = 9,51 * T^{0,393}$	30,0	12,0	Média

Ta e T é dado em min, X em m e Y em mm.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 2 são apresentados os resultados das simulações realizadas pelo “software” ‘Planeja-Sulcos’ efetuadas para os solos A e B.

TABELA 2. Resultados gerais do projeto, simulados pelo “software” ‘Planeja-Sulcos’, para solos A e B

Item	Solo A	Solo B	Unidade
Vazão	720	432	m ³ h ⁻¹
Potência do motor elétrico	100	50	cv
Diâmetro da tubulação adutora	350	350	mm
Potência instalada por unidade de área	4,94	2,47	cv ha ⁻¹
Lâmina requerida pela cultura	30,0	36	mm
Período de irrigação	6	8	dias
Tempo de avanço	117,5	10,43	min
Comprimento do sulco	220	21,47	m
Número total de parcelas	6	85	un
Área da parcela	3,3	0,1932	ha
Número de sulcos por parcela	200	120	un
Número total de sulcos	1200	10200	un
Área Total	20,25	20,25	ha

Verificou-se, pelos resultados apresentados na Tabela 2, que a potência instalada por unidade de área é elevada, o que pode ser explicado pelo elevado número de sulcos por parcela, devendo ser os mesmos irrigados ao mesmo tempo. Observou-se, ainda, que o solo A apresentou sulcos mais extensos que o solo B; isso se deve à infiltração acumulada, que, no solo A é menor que

no solo B e ao tempo de avanço, que, para o solo A também é menor que para o B. As propriedades físicas do solo, permitiram o dimensionamento de sulcos com comprimento diferentes, além de alterar o período de irrigação, afetando a rotina de manejo da irrigação. Notou-se, também, uma relação direta entre o comprimento dos sulcos, o número de parcelas e o período de irrigação. Resultados estes, que eram esperados e que, portanto, demonstram a confiabilidade do 'Planeja-Sulcos'.

Na Tabela 3 são mostrados os resultados das simulações realizadas pelo "software" 'Planeja-Sulcos', para os solos A e B. Destaca-se, na tabela, a receita líquida.

TABELA 3. Resultados das simulações para os solos A e B: fração da água consumida em todo o ciclo da cultura, fornecida pela irrigação (fi), custo da energia elétrica (Ce), custo da água (Ca), tempo de reposição (Tr), produtividade (P), lâmina econômica (W), renda líquida (RL), área de déficit (Ad), eficiência de aplicação (Ea), perda por escoamento (Pe) e perda por percolação (Pp)

Solo	Fi	Ce R\$ kW ⁻¹ h ⁻¹	Ca R\$ m ⁻³	Tr min	P kg ha ⁻¹	W mm	RL R\$ ha ⁻¹	Ad %	Ea %	Pe %	Pp %
A	1,0	0,179	0,01	150	2781,51	547,74	-557,71	11,82	30,38	63,71	5,91
	1,0	0,179	0,00	156	2808,74	465,88	-430,71	9,09	29,79	63,87	6,34
	1,0	0,000	0,01	178	2889,20	495,18	1099,51	0,00	27,69	64,45	7,86
	1,0	0,000	0,00	178	2889,20	495,18	1238,36	0,00	27,69	64,45	7,86
	0,75	0,179	0,01	164	2272,24	357,48	-202,06	5,91	29,01	64,09	6,90
	0,75	0,179	0,00	172	2324,56	365,46	-101,97	2,27	28,25	64,30	7,45
	0,75	0,000	0,01	178	2362,11	371,39	1059,71	0,00	27,69	64,45	7,86
	0,75	0,000	0,00	178	2362,11	371,39	1163,85	0,00	27,69	64,45	7,86
B	1,0	0,179	0,01	10	1638,52	294,29	-1246,29	100,00	36,62	63,38	0,00
	1,0	0,179	0,00	12	1711,12	308,63	-1163,49	100,00	34,98	65,02	0,00
	1,0	0,000	0,01	28	2084,35	397,68	188,84	0,00	23,59	74,68	1,73
	1,0	0,000	0,00	28	2084,35	397,68	337,55	0,00	23,59	74,68	1,73
	0,75	0,179	0,01	9	1173,70	215,01	-859,24	100,00	37,51	62,49	1,73
	0,75	0,179	0,00	11	1245,77	226,20	-800,42	100,00	35,78	64,22	1,73
	0,75	0,000	0,01	28	1658,99	298,26	202,71	0,00	23,59	74,68	1,73
	0,75	0,000	0,00	28	1658,99	298,26	314,24	0,00	23,59	74,68	1,73

O sistema apresentou baixa eficiência de aplicação da água (variando entre 23,59 e 37,51%) e altas perdas por escoamento (variando entre 62,49 e 74,68%), resultando em prejuízo para o cultivo do feijão irrigado. Segundo Soares et al. (2000), estudos realizados em diversos projetos públicos no Brasil, apontaram eficiências de aplicação da água variando entre 25 e 40%. Smith et. al (2005), também encontraram valores médios de eficiência de aplicação, em sistemas de irrigação por sulcos, abaixo de 48%, atingindo valores de até 17%. Os mesmos autores relatam que melhorias significativas no desempenho dos sistemas de irrigação por sulcos foram obtidas em simulações adicionais, através da aplicação de práticas avançadas de gestão da irrigação, avaliação e adequação da vazão e tempo de irrigação, adequados às condições específicas do solo. Já Rezende et al. (1992)

e Soares et al. (2000) recomendam, para elevar a eficiência de aplicação de água em irrigação por sulcos, a redução da vazão inicial.

Verificou-se que, quando se considera os custos da água e energia elétrica, a rentabilidade líquida assume os menores valores encontrados, chegando a ser negativos, mesmo com redução da fração da água fornecida pela irrigação, de 1,0 para 0,75. Quanto menores os custos envolvidos maiores as rentabilidades obtidas. A rentabilidade líquida da produção mostrou-se mais sensível à variação do custo da energia que ao custo da água. Para o solo A, situação em que os tempos de corte ótimos da irrigação são elevados e consequentemente as lâminas ótimas infiltradas se aproximam da lâmina de máxima produção, as áreas de déficit são tanto menores quanto menores são os custos dos insumos da irrigação (água e energia elétrica). Por esse comportamento observa-se que, para esse cenário, um aumento do custo dos insumos da irrigação geraria uma redução da receita líquida superior ao aumento gerado devido à elevação de produtividade. Essa análise mostra a grande importância que a adequação do manejo da irrigação tem sobre a rentabilidade final do sistema produtivo e que o custo da energia elétrica foi o fator mais limitante para o sucesso econômico da irrigação por sulcos com drenagem livre. Situação semelhante também foi observada para o solo B, porém com redução da área de déficit somente para redução do custo do insumo energia elétrica.

Observou-se que a redução da água fornecida pela irrigação em 25% ($F_i = 0,75$), reduziu a produtividade em 18,01% e 23,68% para os solos A e B, respectivamente. Entretanto, ao se considerar o custo da energia elétrica, observou-se um maior valor de receita líquida para este manejo da irrigação ($F_i = 0,75$); todavia, quando o custo da energia foi suprimido a rentabilidade foi ligeiramente menor com $F_i = 0,75$. Excessão a este fato ocorreu para o solo B, na situação que não há custo da energia elétrica, mas há custo da água. Estes resultados permitem inferir que quando houver custo de adução da água de irrigação é recomendável realizar uma irrigação com déficit e quando não houver custo de adução da água pode-se aplicar toda a lâmina requerida pela cultura.

Ao se comparar as Receitas Líquidas entre os dois solos, observou-se que para o solo A os valores obtidos foram bem superiores, o que mostra a maior adequação deste método de irrigação (superfície) para solos mais argilosos. Isso pode ser explicado pelo fato das lâminas econômicas ficarem mais próximas à Lâmina de máxima produção na situação do solo A, mesmo sendo as perdas por percolação e por escoamento menores para o solo B, na situação de déficit. A partir desta comparação, verifica-se que os resultados econômicos do cultivo do feijão irrigado foram influenciados de maneira diferente pelos parâmetros físico-hídricos dos solos utilizados nas simulações.

Ficou evidente, pelas simulações feitas para a cultura do feijão, que, a irrigação por sulcos, no Brasil, não é rentável quando se utiliza energia para a adução de água, sendo recomendado fornecimento de água por gravidade. Resultado este esperado e que reforça a confiabilidade do modelo e “software” desenvolvido.

Analisando os resultados obtidos nas simulações, verificou-se que além da otimização econômica da fase de reposição, deve-se preferir alternativas técnicas que promovam a elevação da eficiência de aplicação da água e, conseqüentemente, a redução da perda por escoamento do projeto, principalmente nos casos em que for utilizada energia para adução da água de irrigação. Yohannes & Tadesse (1998), comparando os efeitos da irrigação por gotejamento com os da irrigação por sulcos observaram que o rendimento da cultura foi menor nas lavouras irrigadas por sulco. A partir desses resultados, observa-se que a baixa eficiência do método afeta a rentabilidade, não somente devido a um aumento do custo, mas também por uma redução no rendimento da lavoura. Estes resultados reforçam a importância do desenvolvimento e utilização de ferramentas que otimizem o uso da água e energia, com conseqüente melhoria na eficiência dos sistemas de irrigação por sulcos.

CONCLUSÃO

A metodologia utilizada no desenvolvimento do aplicativo computacional 'Planeja Sulcos' mostra-se adequada para o dimensionamento econômico da fase de reposição na irrigação por sulcos.

O aplicativo computacional 'Planeja-Sulcos', nas simulações feitas, mostra-se como uma ferramenta confiável para o planejamento econômico da irrigação por sulcos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CARVALHO D.F.; SILVA W.A.; MÉDICE L.O.; PEREIRA M.G. Avaliação de um sistema automático de baixo custo para manejo da irrigação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 30, 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: SBEA, 2001. CD-ROM, 2001.
- DUARTE, S.N.; SILVA, E.F.F. Dimensionamento econômico de sistemas de tubulações em ramais. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.22, n.3, p.332-338, 2002.
- FIGUERÊDO, S.F.; FRIZZONE, J.A.; POZZEBON, E.J.; AZEVEDO, J.A.; GUERRA, A.F. Estabelecimento do momento de irrigação com base na tensão de água no solo para a cultura do feijoeiro. **Engenharia Rural**, Piracicaba, v.9, n.2, p.35-49, 1998.
- FRIZZONE J.A. **Irrigação por aspersão: Uniformidade e eficiência**. Série Didática ESALQ – Departamento de Engenharia Rural, Piracicaba, n.3, 53 p. 1992.
- GARRIDO, M.A.T.; SILVA, A.M.; FARIA, M.A.; LIMA, L.A. Estudo da infiltração e avanço de água em sulcos de irrigação sob diferentes regimes de fluxo e vazões. **Ciência e Prática**, Lavras, v.18, n.2, p.200-208, 1994.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Censo Agropecuário 2006**, IBGE, 2009, disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/pesquisas/ca/>>. Acesso em: 08 fev. 2011.
- MOHAMED, H.I.; ABAS, O.M.; ELABDIN, A.R.A.Z.; EL RAMLAWI, H.R. Development of a Muskingum-Cunge routing model for design of furrow irrigation. **Agriculture And Biology Journal of North America**, Milford-Connecticut -USA, v. 1, n 5, p1014-1030, 2010.

OLITTA, A.F.L. **Os métodos de irrigação**. 1 ed. São Paulo: Nobel, 1984. 267p.

REZENDE, F.C.; FRIZZONE, J.A.; BOTREL, T.A. Otimização dos parâmetros de projeto de um sistema de irrigação por sulcos: II análise da sensibilidade do custo da água, da mão-de-obra e das estruturas hidráulica. **Engenharia Rural**, Piracicaba, v.3, n.2, p.32-49, 1992.

SAAD A.M.; LIBARDI P.L. Aferição do controle da irrigação feito pelos agricultores utilizando tensiômetros de faixas. IPT, **Guairá**, São Paulo, v.1, n.2147, p.1-14, 1994.

SMITH, R.J.; RAINE, S.R.; MINKEVICH, J. Irrigation application efficiency and deep drainage potential under surface irrigated cotton. **Agricultural Water Management**, Sacramento-CA, v.71, n.2, p.117-130, 2005. Disponível em: <www.sciencedirect/science>. Acesso em: 10 mar. 2010.

SOARES, A.A.; OLIVEIRA, R.A.; RAMOS, M.M.; RASCH, A.; D'ÁVILA, J.H.T. Dimensionamento da irrigação por sulcos com redução de vazão: nova metodologia. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.20, n.2, p.119-129, 2000.

YOHANNES, F.; TADESSE, T. Effect of drip and furrow irrigation and plant spacing on yield of tomato at Dire Dawa, Ethiopia. **Agricultural Water Management**, Sacramento-CA, v.35, n.3, p.201-207, 1998. Disponível em: <www.sciencedirect/science>. Acesso em: 10 mar. 2010.

