



Acta Scientiarum. Agronomy

ISSN: 1679-9275

eduem@uem.br

Universidade Estadual de Maringá

Brasil

Garcia de Figueiredo, Margarida; Frizzone, José Antônio; Momenti Pitelli, Mariusa; Rezende, Roberto  
Lâmina ótima de irrigação do feijoeiro, com restrição de água, em função do nível de aversão ao risco  
do produtor

Acta Scientiarum. Agronomy, vol. 30, núm. 1, 2008, pp. 81-87  
Universidade Estadual de Maringá  
Maringá, Brasil

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=303026577012>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal  
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

# Lâmina ótima de irrigação do feijoeiro, com restrição de água, em função do nível de aversão ao risco do produtor

**Margarida Garcia de Figueiredo<sup>1</sup>, José Antônio Frizzone<sup>2\*</sup>, Mariusa Momenti Pitelli<sup>1</sup> e Roberto Rezende<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Departamento de Administração, Economia e Sociologia Rural, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, São Paulo, Brasil. <sup>2</sup>Departamento de Engenharia Rural, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Av. Pádua Dias, 11, 13418-900, Piracicaba, São Paulo, Brasil.

<sup>3</sup>Departamento de Agronomia, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, Paraná, Brasil. \*Autor para correspondência. E-mail: frizzone@esalq.usp.br

**RESUMO.** Em decorrência da atual pressão econômica sobre os agricultores, da crescente competição pelo uso da água e dos impactos ambientais, deverá ocorrer uma mudança de paradigma no manejo da irrigação, enfocando-se mais a eficiência econômica do que a exigência de água pela cultura. Desta forma, considerando a importância sócio-econômica que o feijão tem no Brasil, associado ao fato de tratar-se de uma cultura de elevado padrão de risco devido à grande sensibilidade tanto ao déficit hídrico quanto ao excesso de água, a realização de trabalhos utilizando-se técnicas de otimização no manejo da irrigação de feijão torna-se cada vez mais necessário. Neste trabalho objetivou-se propor um método para determinar a quantidade ótima de irrigação, considerando diferentes combinações entre receita líquida esperada para a cultura do feijoeiro e nível de risco, obtendo uma relação entre a receita líquida esperada, associada a um certo grau de risco econômico, e as lâminas de irrigação, quando o único fator limitante à produção é a disponibilidade hídrica.

**Palavras-chave:** irrigação, otimização, risco, feijão.

**ABSTRACT.** Optimal irrigation depth for bean crops considering water constraints and farmer's risk aversion level. Nowadays, the rising competition for the use of water and environmental resources with consequent restrictions for farmers should change the paradigm in terms of irrigation concepts, or rather, in order to attain economical efficiency other than to supply water requirement for the crop. Therefore, taking into account the social and economical role of bean activity in Brazil, as well as the risk inherent to crop due to its high sensibility to both deficit and excessive water, the optimization methods regarding to irrigation management have become more interesting and essential. This study intends to present a way to determine the optimal water supply, considering different combinations between desired bean yield and level of risk, bringing as a result a graph with the former associated with the latter, depending on different water depths.

**Key words:** irrigation, optimal, risk, bean.

## Introdução

O manejo da irrigação supõe o uso criterioso do recurso hídrico disponível para se atingir um determinado objetivo, como exemplo, alcançar alta produtividade das culturas com o uso eficiente da água, da energia e de outros fatores de produção. Além disso, outros objetivos, como maximizar a produção vegetal por unidade de custo da mão-de-obra ou do capital investido, podem ser também estabelecidos.

As práticas convencionais de irrigação baseiam-se na necessidade de água da cultura e na eficiência de utilização da água, sendo duas as estratégias básicas para estabelecimento de um calendário de irrigação:

(a) suprir totalmente a necessidade de água da cultura (irrigação plena), em que o objetivo é aplicar uma lâmina média capaz de suprir o déficit hídrico e proporcionar a máxima produção por unidade de área (Doorenbos e Pruitt, 1984); (b) suprir parcialmente a necessidade hídrica da cultura (irrigação com déficit), cujo objetivo é aplicar uma lâmina média, inferior àquela para a máxima produtividade, visando maximizar a produção por unidade de volume, aumentando assim, a eficiência de aplicação da água (Phene, 1989). Esta segunda estratégia pressupõe que a disponibilidade hídrica constitui a limitação da produção agrícola, enquanto que a primeira estratégia pressupõe que o fator limitante é a terra.

De acordo com Frizzone (2004), a irrigação para atender plenamente a demanda de água da cultura é um problema relativamente simples e claramente definido, com um objetivo único de suplemento hídrico. Entretanto, uma mudança fundamental deverá ocorrer nas práticas da irrigação nos próximos anos, em decorrência das pressões econômicas sobre os agricultores, da crescente competição pelo uso da água e dos impactos ambientais da irrigação. Tais fatores deverão motivar uma mudança de paradigma da irrigação, enfocando-se mais a eficiência econômica do que a demanda de água da cultura.

Este novo enfoque, o qual pode ser descrito como “otimização”, considera explicitamente fatores econômicos (tais como custos e lucros) que não são considerados no manejo tradicional da irrigação que tem sido geralmente praticado (visando maximizar a produtividade). Porém, irrigar para maximizar o lucro é um problema substancialmente mais complexo e desafiador.

Sob o foco econômico, uma irrigação ótima implica menores lâminas aplicadas em relação à irrigação plena, com consequente redução da produtividade da cultura, mas com algumas vantagens significativas. Seus benefícios potenciais advêm de três fatores: aumento da eficiência da irrigação; redução dos custos da irrigação e redução dos riscos associados aos impactos ambientais adversos da irrigação plena. Muitos pesquisadores, entre eles Stewart *et al.* (1974), English e Nuss (1982), English (1990), Calheiros *et al.* (1996), Queiroz *et al.* (1996) e Frizzone *et al.* (1997), analisaram os benefícios econômicos da irrigação ótima em circunstâncias específicas e concluíram que a técnica pode aumentar a receita líquida proporcionada pelas culturas irrigadas.

Para Yaron (1971), Palácios (1981) e Vaux Júnior e Pruitt (1982), nos estudos econômicos relativos ao planejamento da irrigação, são indispensáveis as funções de resposta das culturas à água, conhecidas como função de produção água-cultura. O problema é encontrar a solução ótima para a combinação insumo-produto, que possa maximizar a receita líquida sujeita às restrições de recursos pré-fixadas para uma determinada tecnologia e estrutura de preços.

Na literatura podem ser identificadas várias alternativas para definir o manejo ótimo da irrigação (Vaux Júnior e Pruitt, 1982; Allan, 1999; Playán e Mateos, 2006; Passioura, 2006), podendo-se classificá-las em dois grupos: (a) pelo aumento da eficiência técnica - quando a disponibilidade de água não é o fator limitante e o objetivo é estabelecer o nível de irrigação que maximiza a produtividade da

cultura; por outro lado, sendo a água escassa, o objetivo é maximizar a eficiência de uso de água, ou seja, maximizar a produtividade por unidade de volume de água aplicada. Neste caso, o aumento da eficiência técnica pressupõe produzir o máximo com menor uso de água, sendo este objetivo alcançado com a redução das perdas de água com a melhoria das estruturas de condução e distribuição de água e das técnicas de manejo da irrigação; (b) pelo aumento da eficiência econômica - o aumento da eficiência econômica significa obter o máximo retorno econômico por unidade de área cultivada ou por unidade de volume de água utilizada, dependendo da escassez relativa desses recursos. Enquanto a disponibilidade de terra for escassa em relação à água, o objetivo deverá ser selecionar a quantidade de irrigação que maximiza a receita líquida por unidade de área; por outro lado, sendo a água restrita em relação à terra, o objetivo deverá ser maximizar a receita líquida por unidade de volume de água.

De acordo com Playán e Mateos (2006), os tomadores de decisão em irrigação preferem utilizar as alternativas de manejo da irrigação baseadas no aumento da eficiência técnica. As razões para essa escolha possivelmente surgem dos seguintes fatores: (a) é uma escolha descompromissada; (b)催化iza alguns setores da economia, como da construção civil; e (c) não explicita insucessos para o produtor.

Embora a otimização da irrigação tenha sido tema de diversas pesquisas durante algumas décadas, atualmente, esta não tem sido sistematicamente utilizada na agricultura produtiva. English *et al.* (2002) citam uma revisão de literatura sobre o tema apontando muitos artigos teóricos, porém, com poucas aplicações práticas. De maneira geral, os livros-texto de irrigação mostram que sempre é recomendado o dimensionamento formal da irrigação para a máxima produtividade das culturas. Frizzone (2004) afirma que a aparente relutância para explorar completamente o conceito de irrigação ótima em um contexto de eficiência econômica, deve-se possivelmente a crença de que os benefícios desta técnica podem não justificar os riscos envolvidos, uma vez que a utilização de técnicas de otimização no manejo da irrigação, operando em condições de déficit hídrico, está associada a uma parcela de risco.

Além destes conceitos a serem considerados quando se trabalha com técnicas de otimização, a questão da incerteza adiciona uma nova dimensão ao problema. Devido aos efeitos imprevisíveis do clima, doenças, solos e vários outros fatores, as produtividades que serão alcançadas com uma

determinada quantidade de água são incertas. E ao considerar que os custos de produção, os preços do produto e os custos diretamente associados à água de irrigação são igualmente incertos, a complexidade da análise pode ser ainda maior, uma vez que as variáveis envolvidas no problema deverão ser tratadas como aleatórias, atribuindo-se a cada uma delas uma distribuição de probabilidades e, por simulação, gerando-se valores aleatórios de receita líquida para cada lâmina de irrigação pertencente a um intervalo de soluções economicamente viáveis (Frizzone, 2004).

Para muitos administradores, a estratégia de irrigação escolhida será aquela que maximiza a receita líquida esperada. Mas o problema de decisão pode ser complicado pelo fato de que os tomadores de decisão têm diferentes aversões ao risco e as estratégias de irrigação que oferecem o maior retorno líquido esperado podem também estar associadas a um maior risco de perda. Entre optar por uma estratégia de alto risco, com uma elevada expectativa de lucro, ou por uma estratégia alternativa com menor potencial de lucro, mas com menor probabilidade de perda, um produtor que apresenta aversão ao risco pode preferir esta última opção.

A significância da aversão ao risco foi demonstrada por Frizzone *et al.* (2001), que utilizaram a teoria da árvore de decisão e da função utilidade para estudar a viabilidade da irrigação suplementar da cana-de-açúcar na Região Norte do Estado de São Paulo. Entretanto, de acordo com Frizzone (2004), um caso mais simples de análise de decisão pode ser feita, considerando-se apenas a incerteza na função de produção água-cultura, utilizando a distribuição triangular e o método de Monte Carlo para gerar valores esperados de receita líquida e seus respectivos desvios (que representam a medida de risco), equivalentes a cada lâmina de água dentro de um intervalo de uso ótimo.

Diante de toda esta discussão e, paralelamente, considerando a grande importância econômica e social que o feijão apresenta no Brasil, torna-se interessante a realização de estudos sobre aplicação de técnicas de otimização no planejamento da irrigação do feijoeiro. Isto também se justifica pelo fato de o feijoeiro ser uma cultura de elevado padrão de risco, devido à grande sensibilidade tanto ao déficit hídrico quanto ao excesso de água, tornando-se cada vez mais interessante a tecnificação da produção, utilizando-se de sistemas de irrigação e outras tecnologias, que promovam incrementos de produtividade, tornem a oferta mais constante ao longo do ano e reduzam o risco associado à

atividade.

Além disso, Azevedo e Caixeta (1986) verificaram que a produção de feijão irrigado é mais alta quando comparada à produção de feijão não irrigado (cultivado em período chuvoso). Ressalta-se que, de acordo com Figueiredo (1998), a utilização inadequada de tecnologias e o uso de processos rudimentares causam baixos rendimentos da cultura do feijoeiro no Brasil.

O objetivo deste trabalho foi determinar a quantidade ótima de irrigação para a cultura do feijoeiro, considerando diferentes combinações entre receita líquida esperada e nível de risco associado, em que a combinação a ser utilizada dependerá do perfil de cada produtor, isto é, da quantidade de risco que ele está disposto a correr para cada nível de receita líquida a ser alcançado.

## Material e métodos

Neste estudo utilizou-se o modelo desenvolvido por Frizzone (2004) para maximização da receita líquida em função da lâmina de irrigação, considerando situações em que a água é o único fator limitante da produção.

Utilizou-se uma função de produção água-cultura do tipo:  $y(w) = r_0 + r_1 w + r_2 w^2$ , em que:

$$\begin{aligned} \frac{dy(w)}{dw} &= r_1 + 2r_2 w = 0 \\ w_m &= -\frac{r_1}{2r_2} \\ y(w_m) &= r_0 - \frac{r_1^2}{4r_2} \end{aligned}$$

sendo que  $w_m$  representa a lâmina de água que maximiza a produtividade, e  $y(w_m)$  representa a produtividade potencial da cultura irrigada.

Quando a quantidade de irrigação é limitada pela disponibilidade de água ou pela capacidade do sistema de irrigação e a terra é relativamente abundante, a estratégia ótima de irrigação é aplicar uma lâmina de água que maximize a receita líquida por unidade de volume de água. Para determinar esta lâmina ótima de irrigação utilizou-se o processo de otimização com operadores de Lagrange.

Em que:

$$\max Z(w) = x[p y(w) - c_f - c_w w]$$

sujeito a

$$g = xw - V$$

sendo  $Z(w)$  a receita líquida em função da lâmina de água,  $g$  a função de restrição de água,  $x$  a área irrigada,  $p$  o preço unitário do produto,  $y(w)$  a produtividade da cultura,  $c_f$  os custos fixos da produção,  $c_w$  o custo da água,  $w$  a lâmina de irrigação,  $xw$  o volume de água utilizado e  $V$  o volume de água disponível para irrigação.

Tem-se então:

$$L(x, w, \lambda) = x[y(w)p - c_f - c_w w] - \lambda(xw - V) \quad (1)$$

A condição de ótimo é obtida igualando a zero as derivadas parciais da função Lagrangeana, em relação a  $w$ ,  $x$  e  $\lambda$ :

$$\frac{\partial L}{\partial x} = y(w)p - c_f - c_w w - \lambda w = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial L}{\partial w} = x \left( \frac{dy}{dw} p - \frac{dh}{dw} - c_w \right) - \lambda x = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda} = -xw + V = 0 \quad (4)$$

Da equação (3) obtém-se o preço-sombra da água, o qual representa o acréscimo da receita líquida por unidade de volume de água adicional:

$$\lambda = \frac{dy}{dw} p - \frac{dh}{dw} - c_w \quad (5)$$

Quando a disponibilidade de água para irrigação é restrita, o custo de oportunidade da água ( $\lambda$ ) constitui o fator mais importante do manejo da irrigação. Sendo este o caso, a redução na quantidade de água aplicada deverá ser a estratégia racional de manejo da irrigação e a água economizada pela irrigação com déficit deve ser usada para irrigar uma área adicional, aumentando a receita líquida da propriedade agrícola. O acréscimo potencial da receita líquida proveniente do acréscimo da área irrigada é o custo de oportunidade da água e representa o maior preço que se poderá pagar para alocar uma unidade adicional de volume de água para aquela atividade.

No ponto ótimo, o valor líquido do produto marginal da água iguala-se à soma do preço sombra e do custo da água:

$$\frac{dy}{dw} p - \frac{dh}{dw} = \lambda + c_w \quad (6)$$

Aplicando-se os operadores de Lagrange, das relações  $\frac{\partial L}{\partial x}$  e  $\frac{\partial L}{\partial w}$  obtém-se a quantidade ótima de água para irrigação:

$$w^* = \sqrt{\frac{p r_0 - c_f}{p r_2}} \quad (7)$$

Existe também uma quantidade de água  $w_{ew}$  que produz uma receita líquida equivalente àquela obtida com um nível de irrigação  $w_m$  (para produtividade potencial). Desta forma, para  $Z(w_m)$  e  $Z(w_{ew})$ , tem-se:

$$Z(w_m) = xz(w_m) \quad (8)$$

$$Z(w_{ew}) = xz(w_{ew}) \quad (9)$$

Igualando-se (8) a (9), e fazendo algumas substituições e manipulações algébricas, chega-se à:

$$W_{ew} = \frac{-b + \sqrt{(b^2 - 4ac)}}{2a} \quad (10)$$

em que:

$$a = p r_2 \quad (11)$$

$$b = \frac{4p r_0 r_2 + p r_1^2 - 4 r_2 c_f}{2 r_1} \quad (12)$$

$$c = p r_0 - c_f \quad (13)$$

Deve-se ressaltar, entretanto, que devido aos efeitos imprevisíveis do clima, doenças, solos, e outros fatores, as produtividades das culturas que serão alcançadas com uma determinada quantidade de água são incertas.

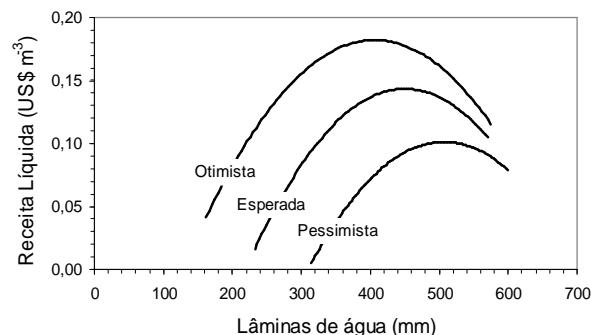
Baseado em um estudo desenvolvido por Figueiredo et al. (1998) para a cultura do feijoeiro, no Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados, Brasília, Distrito Federal, durante quatro anos de experimentação em campo (1988, 1989, 1990 e 1991), estimou-se três funções de produção águacultura para feijão: uma otimista, uma mais provável (média esperada) e uma pessimista, representando assim a incerteza da função de produção, uma vez que para uma mesma lâmina de água, a produtividade varia dentro do intervalo de um valor mais pessimista até um valor mais otimista:

$$\text{Otimista : } Y = -910,14 + 14,31w - 0,01 w^2 \\ R^2 = 0,9883 \quad (14)$$

$$\text{Esperada : } Y = -2.161,7 + 18,12w - 0,02 w^2 \\ R^2 = 0,7106 \quad (15)$$

$$\text{Pessimista : } Y = -3.734,23 + 21,86w - 0,018 w^2 \\ R^2 = 0,9838 \quad (16)$$

Para cada uma das funções, calcularam-se as três lâminas de água necessárias durante o ciclo: a lâmina que proporciona a produtividade potencial ( $W_m$ ); a lâmina que proporciona a receita líquida máxima por  $m^3$  de água ( $W^*$ ); e a lâmina que proporciona uma receita líquida igual àquela proporcionada pela lâmina de produtividade potencial ( $W_{eu}$ ). Estimaram-se então as receitas líquidas equivalentes às três lâminas para cada função, traçando-se um gráfico de receitas líquidas em função das lâminas de irrigação (Figura 1), a partir do qual selecionou-se o intervalo de lâminas de água para serem realizadas as simulações pelo método de Monte Carlo, utilizando a distribuição de probabilidades triangular: 230 a 600 mm.



**Figura 1.** Receita líquida em função da lâmina de água, para as estratégias de irrigação do feijoeiro, sob restrição de água, para os cenários otimista, esperado e pessimista, considerando-se  $p = \text{US\$ } 0,53 \text{ kg}^{-1}$ ,  $c_f = \text{US\$ } 420 \text{ kg}^{-1}$  e  $c_w = \text{US\$ } 0,50 \text{ mm}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ .

Para cada lâmina de água dentro do intervalo considerado foram simulados 2.000 valores de preço pago ao produtor, 2.000 valores de produtividade e 2.000 valores de custo variável da irrigação. A partir destes valores e considerando um valor de custo fixo de produção de feijão, foram simulados 2.000 valores de receita líquida em  $\text{US\$ m}^{-3}$ . Desta forma, estimou-se para cada lâmina um valor de receita líquida esperada, associado ao seu desvio padrão, o qual representa a medida de risco. Finalmente, traçou-se um gráfico das receitas líquidas esperadas e desvios, em função das lâminas, a partir do qual o produtor pode tomar a decisão de qual lâmina de água utilizar para irrigação durante o ciclo da cultura,

considerando seu nível de aversão ao risco.

Para as simulações assumiu-se que as variáveis referentes ao preço pago ao produtor, ao custo variável da irrigação e à produtividade, têm distribuição de probabilidades triangular. Na simulação Monte Carlo para uma variável com distribuição triangular são necessários três valores iniciais: otimista (b), mais provável (m) e pessimista (a). No caso do preço pago ao produtor, os valores foram obtidos no banco de dados do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea, 2005), deflacionados pelo IGP-DI da Fundação Getúlio Vargas (FGV, 2005), com base em junho de 2005, e convertidos em dólar, considerando uma taxa de câmbio de 2,25. Os valores de produtividade otimista, esperado e pessimista, para cada lâmina de irrigação, foram estimados a partir das três funções de produção água-cultura. e os valores de custo variável foram obtidos em Frizzone (2004). O custo fixo não foi simulado, utilizando-se o valor constante de  $\text{US\$ } 420 \text{ ha}^{-1}$  obtido em Frizzone (2004). Na Tabela 1 mostram-se os valores de preços e custos utilizados nas simulações. Para o caso de custo, a estimativa otimista foi a de menor valor, porém, na simulação Monte Carlo, para efeito de cálculo, a estimativa otimista de qualquer variável é sempre o maior valor entre as três opções. Na Tabela 2 apresentam-se os valores de lâminas de água e as respectivas produtividades utilizadas nas simulações.

**Tabela 1.** Valores de preços ( $\text{US\$ kg}^{-1}$ ) e custo variável ( $\text{US\$ m}^{-3}$ ) utilizados nas simulações.

	Preço*	Custo variável**
Pessimista	0,47	0,32
Mais Provável	0,53	0,50
Otimista	1,13	0,74

Fonte: \*Ipea (2005) e \*\*Frizzone (2004)

**Tabela 2.** Lâminas de água (mm) e produtividades ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) utilizadas nas simulações.

Lâminas	Pessimista	Esperada	Otimista
230	314,85	1.160,12	1.722,94
250	574,45	1.368,98	1.889,60
270	819,24	1.565,03	2.046,31
290	1.049,23	1.748,28	2.193,04
310	1.264,43	1.918,74	2.329,81
330	1.464,82	2.076,39	2.456,60
350	1.650,42	2.221,25	2.573,44
370	1.821,21	2.353,30	2.680,30
390	1.977,20	2.472,55	2.777,20
410	2.118,40	2.579,01	2.864,13
430	2.244,79	2.672,66	2.941,09
450	2.356,39	2.753,52	3.008,09
470	2.453,18	2.821,57	3.065,12
490	2.535,17	2.876,82	3.112,18
510	2.602,37	2.919,28	3.149,27
530	2.654,76	2.948,93	3.176,40
550	2.692,36	2.965,79	3.193,56
570	2.715,15	2.969,84	3.200,75
590	2.723,14	2.961,09	3.197,98
600	2.721,59	2.951,92	3.192,85

## Resultados e discussão

Na condição de água restrita a lâmina ótima de irrigação depende do preço do produto e dos custos fixos e a estratégia de irrigação é maximizar a receita líquida por unidade de volume de água aplicada, o que não corresponde à maximização da receita líquida por unidade de área. Na Tabela 3 são apresentadas as estratégias de irrigação da cultura do feijoeiro e as respectivas receitas líquidas por unidade de volume de água aplicada, considerando-se a função de produção água-cultura esperada, três preços para o feijão,  $c_w = \text{US\$ } 0,74 \text{ mm}^{-1} \text{ ha}^{-1}$  e  $c_f = \text{US\$ } 420 \text{ ha}^{-1}$ . Observa-se que ao preço de US\$ 0,35 kg<sup>-1</sup> de feijão, a lâmina ótima é de 458 mm, o que corresponde a um déficit econômico de água de 19,06% em relação à lâmina para irrigação sem déficit. Com esta economia de água, é possível aumentar em 24% a área a ser irrigada, aumentando-se a produção total e, consequentemente, a receita líquida total. Para o preço do produto de US\$ 0,53 kg<sup>-1</sup>, a lâmina ótima é de 430 mm, correspondendo a um déficit de água de 24,13% em relação à irrigação plena. Esta economia de água possibilita aumento de 32% na área irrigada, com consequente aumento na produção e na receita líquida total. Ao preço de US\$ 0,69 kg<sup>-1</sup>, a lâmina ótima é de 416 mm, o que corresponde a uma economia de 26,53%, em relação à lâmina para irrigação sem déficit, possibilitando aumentar em 36% a área a ser irrigada.

**Tabela 3.** Estratégias de irrigação da cultura do feijoeiro, nas condições edafoclimáticas do Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados, Brasília, Distrito Federal, considerando a função de produção esperada,  $c_w = \text{US\$ } 0,74 \text{ mm}^{-1} \text{ ha}^{-1}$  e  $c_f = \text{US\$ } 420 \text{ ha}^{-1}$ .

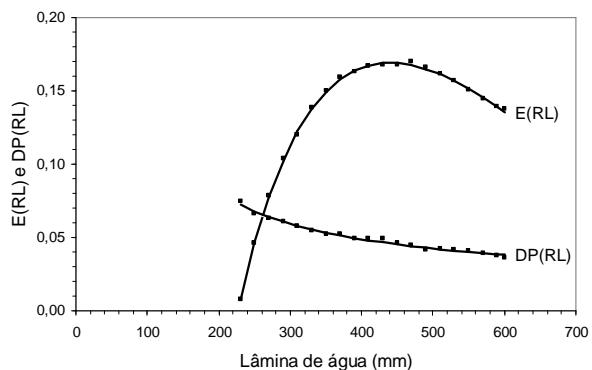
$p^*$ (US\$ kg <sup>-1</sup> )	Uso de água (mm)	Déficit (%)	$y(w)$ (kg ha <sup>-1</sup> )	$Z(W)$ (US\$ m <sup>-3</sup> )	Área irrigada (ha)	Produção (kg)
0,35	$W_m = 566$	2.970,05	0,04	1,00	2.970	
	$W^* = 458$	19,06	2.783,57	0,05	1,24	3.439
	$W_{ew} = 371$	34,49	2.359,52	0,04	1,53	3.602
0,53	$W_m = 566$	2.970,05	0,13	1,00	2.970	
	$W^* = 430$	24,13	2.671,31	0,16	1,32	3.521
	$W_{ew} = 326$	42,43	2.046,01	0,13	1,74	3.554
0,69	$W_m = 566$	2.970,05	0,21	1,00	2.970	
	$W^* = 416$	26,53	2.608,99	0,26	1,36	3.551
	$W_{ew} = 306$	46,01	1.883,48	0,21	1,85	3.489

Fonte: \*Ipea (2005).

Analisando estas estratégias verifica-se que quanto maior o preço do produto, maior é o déficit econômico de água em relação à irrigação plena. É importante também observar que a redução no uso de água proporciona o cultivo de uma quantidade adicional de terra, com um aumento na produção total.

A incerteza adiciona uma nova dimensão ao problema de otimização. Devido aos efeitos imprevisíveis do clima, às doenças, aos solos e a vários outros fatores, a produtividade da cultura em

função da quantidade de irrigação é incerta, conforme se pode observar pelas funções de produção água-cultura obtidas em cada ano de experimentação. Para considerar algumas das incertezas na produção foram simulados valores de receitas líquidas pelo Método de Monte Carlo, com distribuição triangular, estimando-se a expectativa de receita líquida para cada lâmina de água e seu respectivo desvio padrão como medida de risco. As curvas de receita líquida esperada e de risco são apresentadas na Figura 2. Até atingir a receita líquida máxima, na porção do gráfico em que a mesma é crescente, a produtividade média esperada também está crescendo e o custo de produção está decrescendo. A partir do momento em que a receita líquida atinge o seu valor máximo, a produtividade continua crescendo, porém, há taxas cada vez menores (o que se deve ao excesso de água), e o custo de produção começa a aumentar. A redução nas taxas de crescimento da produtividade, associada ao aumento nos custos de produção, resulta na redução da receita líquida. Paralelamente a isto, o risco associado apresenta tendência de queda.



**Figura 2.** Receita líquida esperada [E(RL), US\$ m<sup>-3</sup>] e o respectivo desvio padrão [DP(RL), US\$ m<sup>-3</sup>], em função da lâmina de água.

A Figura 2 pode auxiliar o produtor em tomar a decisão sobre qual lâmina de irrigação deve aplicar. É possível escolher situações de déficit hídrico, com menores produtividades, menores receitas líquidas e maior nível de risco; situações de lâminas de água próximas do ponto ótimo (440 mm), em que os lucros são maiores e os riscos menores; ou finalmente, em condições de excesso de água, em que tanto as receitas quanto os riscos são menores, uma vez que os riscos apresentam tendência de queda na medida em que se aumenta a lâmina de água aplicada. Embora a máxima receita líquida por unidade de volume de água seja um critério econômico racional para seleção da melhor alternativa de alocação de água para a irrigação, os

indivíduos têm diferentes graus de aversão ao risco. Assim, para um irrigante com disposição de assumir menor risco, a decisão seria por uma lâmina de irrigação superior a 440 mm e riscos inferiores a US\$ 0,047 m<sup>-3</sup>, com menor expectativa de receita líquida por unidade de volume de água (inferior a US\$ 0,169 m<sup>-3</sup>). Deve-se observar que a utilização de lâminas de água inferiores a 440 mm não é uma decisão racional porque proporcionam menores valores de receitas líquidas associados a maiores níveis de risco.

### Conclusão

Dada à importância de se utilizar tecnologias mais sofisticadas, objetivando aumentar o lucro e diminuir o risco associado ao mesmo, o método desenvolvido neste trabalho apresentou resultados satisfatórios no que diz respeito a orientar o produtor, que deseja adotar sistema de irrigação na produção de feijão, na escolha da lâmina de água a ser aplicada, considerando seu nível de aversão ao risco. Este método pode ser utilizado para diferentes culturas irrigadas, com diferentes preços e diferentes custos de produção tendo sido o feijão a cultura escolhida para o desenvolvimento do estudo, em virtude da necessidade de novos estudos que auxiliem no avanço da adoção de novas tecnologias no seu sistema produtivo.

### Referências

- ALLAN, T. Productive efficiency and allocative efficiency: why better management may not solve the problem. *Agricultural Water Management*, Amsterdam, v. 40, n. 1, p. 71-75, 1999.
- AZEVEDO, J.A.; CAIXETA, T.J. *Irrigação do feijoeiro*. Planaltina: Embrapa CPAC, 1986. (Circular Técnica, 20).
- CALHEIROS, C.B.M. et al. Estratégias ótimas de irrigação do feijoeiro: água como fator limitante da produção. *Pesq. Agropecu. Bras.*, Brasília, v. 31, n. 7, p. 509-515, 1996.
- DOORENBOS, J.; PRUITT, W.O. *Guidelines for predicting crop water requirements*. Rome: FAO, 1984.
- ENGLISH, M.J. Deficit irrigation. 1: analytical framework. *J. Irrig. Drain. Eng.*, New York, v. 116, n. 3, p. 399-412, 1990.
- ENGLISH, M.J.; NUSS, G.S. Designing for deficit irrigation. *J. Irrig. Drain. Eng.*, New York, v. 108, n. 2, p. 91-106, 1982.
- ENGLISH, M.J. et al. A paradigm shift in irrigation management. *J. Irrig. Drain. Eng.*, New York, v. 128, n. 5, p. 267-277, 2002.
- FAO-Food and Agriculture Organization of United Nations. 2005. Disponível em: <[http://www.fao.org/statistical\\_database](http://www.fao.org/statistical_database)>.
- FIGUERÊDO, S.F. *Estabelecimento do momento de irrigação com base na tensão da água no solo para a cultura do feijoeiro*. 1998. Dissertação (Mestrado)–Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1998.
- FIGUERÊDO, S.F. et al. 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. Otimização do uso da água na agricultura irrigada: perspectivas e desafios. *Engenharia Rural*, Piracicaba, v. 15, único, p. 37-56, 2004.
- FRIZZONE, J.A. et al. Linear programming model to optimize the water resource use in irrigation projects: an application to the Senador Nilo Coelho Project. *Sci. Agric.*, Piracicaba, v. 54, p. 136-148, 1997.
- FRIZZONE, J.A. et al. Viabilidade econômica da irrigação suplementar da cana-de-açúcar, *Saccharum spp.*, para a região Norte do Estado de São Paulo. *Acta Sci. Agron.*, Maringá, v. 23, n. 5, p. 1131-1137, 2001.
- FGV-Fundação Getúlio Vargas. 2005. Disponível em: <<http://www.fgv.br>>. Acesso em: 10 out. 2005.
- IPEA-Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. 2005. Disponível em: <<http://www.ipea.gov.br/ipeadata>>. Acesso em: 4 out. 2005.
- PALÁCIOS, E.V. Response functions of crops yield to soil moisture stress. *Water Res. Bull.*, Minneapolis, v. 17, n. 4, p. 699-703, 1981.
- PHENE, C.J. Techniques for computerized irrigation management. *Computer and Electronics in Agriculture*, New York, v. 3, n. 3, p. 189-208, 1989.
- PASSIOURA, J. Increasing crop productivity when water is scarce – from breeding to field management. *Agricul. Water Manag.*, Amsterdam, v. 80, n. 1-3, p. 176-196, 2006.
- PLAYÁN, E.; MATEOS, L. Modernization and optimization of irrigation systems to increase water productivity. *Agricul. Water Manag.*, Amsterdam, v. 80, n. 1-3, p. 100-116, 2006.
- QUEIROZ, J.E. et al. Estratégias ótimas de irrigação do feijoeiro: terra como fator limitante da produção. *Pesq. Agropecu. Bras.*, Brasília, v. 31, n. 1, p. 55-61, 1996.
- STEWART, J.I. et al. Functions to predict optimal irrigation programs. *J. Irrig. Drain. Eng. Div.*, New York, v. 100, n. 2, p. 179-197, 1974.
- VAUX JR.; PRUITT, W.O. Crop-water production functions. In: HILLEL, D. (Ed.). *Advances in irrigation*. New York: Academic Press, 1982. cap. 2, p. 61-97.
- YARON, D. Estimation and use of water production functions in crop. *J. Irrig. Drain. Eng. Div.*, New York, v. 97, p. 291-303, 1971.

Received on September 13, 2006.

Accepted on February 06, 2007.