



*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Centro Nacional de Pesquisa de Arroz e Feijão
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento*

ISSN 1678-9601

Dezembro, 2003

Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 6

Otimização do Manejo da Irrigação do Feijoeiro Comum Utilizando o Modelo CROPGRO

Alexandre Bryan Heinemann

Santo Antônio de Goiás, GO
2003

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

Embrapa Arroz e Feijão

Rodovia Goiânia a Nova Veneza km 12 Zona Rural
Caixa Postal 179
75375-000 Santo Antônio de Goiás, GO
Fone: (62) 533 2110
Fax: (62) 533 2100
www.cnpaf.embrapa.br
sac@cnpaf.embrapa.br

Comitê de Publicações

Presidente: *Carlos Agustin Rava*
Secretário-Executivo: *Luiz Roberto Rocha da Silva*
Membros: *Luís Fernando Stone*
Pedro Marques da Silveira

Supervisor editorial: *Marina A. Souza de Oliveira*
Normalização bibliográfica: *Ana Lúcia D. de Faria*
Editoração eletrônica: *Fabiano Severino*

1ª edição

1ª impressão (2003): on line

Todos os direitos reservados.

A reprodução não-autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei no 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Embrapa Arroz e Feijão

Heinemann, Alexandre Bryan.

Otimização do manejo da irrigação do feijoeiro comum utilizando o modelo CROPGRO / Alexandre Bryan Heinemann. - Santo Antônio de Goiás : Embrapa Arroz e Feijão; Juiz de Fora : Embrapa Gado de Leite, 2003.

29 p. - (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento / Embrapa Arroz e Feijão, ISSN 1678-9601 ; 6)

1. Feijão - Modelo de Crescimento. 2. Feijão - Irrigação - Manejo.
I. Título. II. Embrapa Arroz e Feijão. III. Série.

CDD 635.652 (21. ed.)

© Embrapa 2003

Sumário

Resumo	5
Abstract	7
Introdução	8
Material e Métodos	10
Resultados e Discussão	18
Conclusões	24
Referências Bibliográficas	26

Otimização do Manejo da Irrigação do Feijoeiro Comum Utilizando o Modelo CROPGRO

Alexandre Bryan Heinemann¹

Resumo

No plantio da primavera, na região de Londrina, no Estado do Paraná, períodos de seca podem ocasionar significativa redução nos rendimentos do feijão. Porém, o uso de irrigação pode possibilitar a obtenção de produtividades elevadas e reduzir os riscos associados à variabilidade das condições climáticas. Sistemas de irrigação por pivô central são comumente utilizados na cultura do feijoeiro na região e são operados para completarem uma revolução em períodos de mais de um dia. No entanto, os modelos de simulação de crescimento de culturas assumem a irrigação de uma determinada área num mesmo dia. Este trabalho apresenta modificações realizadas no modelo de simulação de crescimento CROPGRO visando a fornecer aos irrigantes da região informações para tomadas de decisões que simulem as situações práticas do manejo de irrigação. O modelo modificado considera o número de dias que o pivô central requer para completar uma revolução. Diferentes turnos de rega foram simulados adotando-se sistemas pivô central com diferentes capacidades de aplicação de água e os resultados foram avaliados para a cultura do feijão em função da renda líquida para o Estado do Paraná. Os turnos de rega avaliados incluem a revolução do equipamento de irrigação em um, dois ou três dias. Foram aplicados seis diferentes níveis críticos de umidade do solo para determinar o momento de irrigação, variando-se de 40 a 90% da capacidade de água disponível (CAD) no solo. A capacidade do

¹ Engenheiro Agrônomo, Doutor em Irrigação e Drenagem, Embrapa Gado de Leite - Núcleo Centro-Oeste/ Embrapa Arroz e Feijão, 75375-000 Santo Antônio de Goiás, GO. alexbh@cnpaf.embrapa.br.

sistema de irrigação pivô central que maximizou a renda líquida foi a correspondente à aplicação de uma lâmina de 6 mm dia⁻¹. O turno de rega que resultou na máxima renda líquida foi irrigar a área em um dia, quando o nível crítico de umidade do solo nos primeiros 30 cm do perfil do solo foi de 70 a 80% da capacidade de água disponível no solo (CAD).

Termos para indexação: modelos de crescimento, DSSAT e *Phaseolus vulgaris* L.

Center Pivot Management Optimization of Dry Beans Using Crop Model

Abstract

During the spring growing season, periods of drought can cause a significant reduction in dry bean yield in Brazil. Therefore, irrigation is applied to reduce the risks associated with the variability in weather conditions. The common irrigation system is a center pivot system. Irrigation managers usually operate a center pivot irrigation system in such a way that it requires more than one day to complete the irrigation of an entire field. In general, crop model simulations assume that irrigation of an entire field is completed in one day. This article presents modification made in the CROPGRO simulation model to provide irrigation managers with decision support information that is equivalent to their local conditions. The modified model takes into account the number of days that a center pivot irrigation system requires to complete one revolution. Different management regimes for three different water capacity center pivot systems were evaluated for dry bean as a function of net return for the State of Paraná. The management regimes that were evaluated included the completion of the center pivot revolution in either one, two or three days. Six different irrigation thresholds were applied, ranging from 40 to 90% of the remaining available soil water content, and three different commodity prices were analyzed. The center pivot system that showed the highest net return was the system that applied 6mm day⁻¹. The irrigation management regime that resulted in the highest net return was to irrigate the entire field in one day, when the soil water content in the top 30 cm of the profile dropped below 70 to 80% of available soil water.

Index terms: Crop Model, DSSAT e *Phaseolus vulgaris* L.

Introdução

O feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.), cultivado em diversas regiões do mundo, é uma das principais fontes de proteína para a população mundial, entretanto a sua produtividade pode ser baixa devido ao estresse hídrico (Singh et al., 1991). Estima-se que ocorra estresse hídrico em 60% das áreas de produção de feijão na América Latina (Laing et al., 1984). No Brasil, o feijão é uma das culturas mais importantes, sendo o Estado do Paraná um dos líderes na produção dessa leguminosa. Para a região de Londrina, que possui um clima subtropical úmido, a ocorrência de veranicos (curtos períodos de estresse hídrico) é um dos principais fatores que afetam o rendimento do feijão. Durante a primavera, veranicos são comuns e podem ocasionar severa redução no rendimento em sistemas de produção não irrigados (Caramori & Faria, 1987). Irrigações utilizando o sistema pivô central são aplicadas para aumentar a produtividade e reduzir a variação no rendimento. Nessa região, a maioria dos equipamentos de irrigação tipo pivô central é projetada com uma capacidade de aplicação variando de 5 a 7 mm dia⁻¹, para uma área média irrigada de 60 ha. Os irrigantes normalmente operam o sistema com períodos de revolução de mais de um dia.

Devido ao clima úmido, é comum ocorrer precipitação pluvial depois que parte da área tenha sido irrigada, ocorrendo variações espaciais de umidade no solo e, conseqüentemente, variações de disponibilidade de água na planta, mesmo que o solo na área seja visualmente homogêneo.

As decisões mais importantes a serem tomadas pelos irrigantes são: de quando irrigar e de quanto de água aplicar. Para essa definição, há que se considerar vários fatores no processo de tomada de decisão, para assegurar que o valor adicional da receita proporcionada pela mudança no manejo de irrigação seja maior que o custo da irrigação. Irrigações com datas fixas, baseadas nas condições climáticas médias, conduzem a um ineficiente uso da água devido à variabilidade temporal na quantidade e distribuição da precipitação (Smith et al., 1985; Villalobos & Fereres, 1989).

Pela complexidade do processo de tomada de decisão, pesquisadores têm desenvolvido sistemas de suporte à decisão (SSD) com base em modelos computacionais. Esses sistemas podem fornecer informações para as diversas opções de manejo, considerando-se as condições ambientais locais (Tsuji et al., 1998). Os SSD também possibilitam a compreensão científica das complexas

interações ambientais que se apresentam aos tomadores de decisão. Frequentemente, informações de modelos de simulação são utilizadas como base para os SSD (Keating & Grace, 1999). Neste estudo foi utilizado o SSD "Decision Support System for Agrotechnology Transfer" (DSSAT). O DSSAT consiste de um conjunto de modelos de simulação de culturas que foram integrados em um único programa. Esse programa facilita a aplicação de modelos de simulação de culturas em pesquisas e tomadas de decisão (Tsuji et al., 1994; Jones et al., 1998). A grande vantagem do DSSAT tem sido na padronização e processamento dos dados de entrada e saída. O CROPGRO, um modelo genérico para leguminosas, foi utilizado neste estudo para estimar o rendimento do feijão e as quantidades de irrigação necessárias para determinadas condições edafoclimáticas.

Muitos pesquisadores têm usado os modelos de simulação do DSSAT para identificar cenários ótimos de irrigação para regiões úmidas. Boggess et al. (1983), utilizando o modelo SOYGRO v.4.2, estudaram estratégias de irrigação e o impacto dos resultados na renda líquida. As melhores estratégias de irrigação foram definidas em função da água disponível no solo, profundidade do manejo de irrigação e séries históricas de dados climáticos. Martin et al. (1985) avaliaram diferentes estratégias de irrigação para regiões úmidas utilizando o modelo CERES-maize. Boggess & Ritchie (1988) utilizaram os modelos CERES-maize e SOYGRO para identificar estratégias de irrigação e aplicaram dominância estocástica para avaliar os riscos associados às diferentes estratégias. Faria et al. (1997a), utilizando o modelo BEANGRO para feijão, identificaram as estratégias de irrigação que forneceram o máximo benefício econômico para a região de Londrina, Paraná. Determinaram que a estratégia ótima de irrigação é irrigar quando o nível de umidade crítica no solo for igual a 60% da CAD.

Em todos os trabalhos consultados na literatura, assumiu-se que a irrigação da área total era realizada em um dia. Entretanto, esta situação muitas vezes não ocorre em condições de lavoura, sendo necessário mais de um dia para irrigar toda a área.

O objetivo deste trabalho foi determinar estratégias de irrigação que otimizem a renda líquida do feijão irrigado em Londrina, Paraná, utilizando-se o modelo CROPGRO modificado pela inclusão de uma rotina que considera o tempo de rotação do sistema pivô central.

Material e Métodos

Modelos de crescimento de culturas

CROPGRO é um modelo orientado a processo, desenvolvido para leguminosas, que simula o crescimento, o desenvolvimento vegetativo e os balanços de nitrogênio e água na cultura e no solo. A versão utilizada neste estudo (v3.5, 98.0) simula o rendimento para soja, feijão, amendoim e grão-de-bico (Boote et al., 1997, 1998a; Hoogenboom et al., 1999). O processo de desenvolvimento do modelo CROPGRO utiliza dados climáticos diários, exceto para alguns processos como fotossíntese, em que o passo de cálculo é horário utilizando-se o modelo *leaf-hedgerow* (Boote et al., 1998b).

A performance do modelo BEANGRO para feijão, uma versão anterior ao modelo CROPGRO-Feijão, tem sido avaliada em diversas regiões do mundo. Os rendimentos simulados de feijão mostraram uma boa comparação com os dados observados para condições de estresse hídrico em regiões tropicais (White et al., 1995; Faria et al., 1997b). As variáveis de entrada e saída para os modelos BEANGRO e CROPGRO são idênticas, mudando-se somente a estrutura dos códigos dos modelos (Hoogenboom et al., 1992, 1994).

No modelo CROPGRO, o módulo de balanço hídrico no solo considera todos os processos que afetam diretamente o conteúdo de água do solo. Como outros modelos de simulação do DSSAT, o balanço hídrico é calculado com a mínima quantidade de dados de entrada (Ritchie, 1998). O balanço hídrico no solo é um modelo unidimensional e baseia-se em quatro equações para calcular as variações de armazenamento de água (Jones & Ritchie, 1990; Hoogenboom et al., 1992). Essas variações podem ser descritas pela seguinte equação (1):

$$\Delta S = P + I - EP - ES - R - D \quad (1)$$

em que, ΔS representa a variação de armazenamento de água no solo, P e I são dados de entrada correspondentes à precipitação e à irrigação, EP e ES são dados de saída correspondentes à evaporação da planta e do solo, R o escoamento superficial e D a drenagem, sendo que ambos são dados de saída do perfil do solo. A água no solo é distribuída em várias camadas (máximo de 20) com espessura determinadas pelo usuário (Ritchie, 1985).

A infiltração da água no solo é calculada pela diferença entre a precipitação ou irrigação e escoamento superficial. O escoamento superficial é calculado pelo procedimento modificado do USDA-Soil Conservation Service (SCS), denominada "técnica do número da curva" (Williams, 1991). A drenagem é calculada pelo método denominado *tipping bucket*, assumindo-se para cada camada de solo um valor fixo para o solo saturado, a condutividade hidráulica do solo saturado e a "capacidade de campo". A água disponível no solo varia entre o ponto de murcha permanente e a "capacidade de campo". Se a quantidade de água disponível em uma determinada camada do solo for maior que o valor máximo da "capacidade de campo", o excesso de água é drenado para a próxima camada, baseado no coeficiente de drenagem especificado no arquivo de dados de entrada do perfil do solo. O cálculo desse processo é diário (Ritchie, 1985; Jones & Ritchie, 1990).

A evapotranspiração é baseada no processo descrito por Ritchie (1972). Esse processo separa a evaporação do solo da transpiração da planta. A evapotranspiração potencial é calculada usando a equação de Priestley-Taylor ou FAO24-Penman. A grande vantagem do método de Priestley & Taylor (1972) para se calcular a evapotranspiração potencial é que os dados de entrada são somente os valores diários de radiação solar, temperatura máxima e mínima e o valor do albedo do solo. A evaporação do solo é dada em função da quantidade de água disponível na camada superficial do solo e da energia que alcança a superfície do solo, que é proporcional ao índice de área foliar e ao albedo do solo. A taxa de extração de água pela raiz é calculada usando-se a aproximação *law of the limiting*. Nessa aproximação, a resistência das raízes determina a taxa de fluxo de água para elas. Se as raízes são incapazes de extrair a quantidade de água perdida por transpiração em razão da alta resistência ao fluxo no solo e/ou baixa quantidade de água disponível no solo em uma ou mais camadas, a transpiração é reduzida proporcionalmente. Quando ocorre o estresse hídrico na planta, são introduzidos fatores que reduzem a fotossíntese, a expansão do crescimento e o aumento da partição da biomassa para as raízes (Hoogenboom et al., 1992).

O modelo CROPGRO calcula o nitrogênio extraído pela planta e a sua fixação. Somente os movimentos de nitrato e uréia são considerados e ambos são dependentes do movimento de água no solo. Informações adicionais sobre o balanço de nitrogênio podem ser encontradas em Godwin & Singh (1998).

Modificações realizadas no modelo CROPGRO

Foram feitas modificações nos códigos do modelo CROPGRO para se considerar o tempo que um sistema de irrigação pivô central gasta para completar uma revolução. Essas modificações foram necessárias, pois o modelo assume que a irrigação é realizada em um dia na área total, usando o processo diário da rotina do balanço hídrico no solo. A estrutura modificada no modelo CROPGRO é ilustrada na Figura 1.

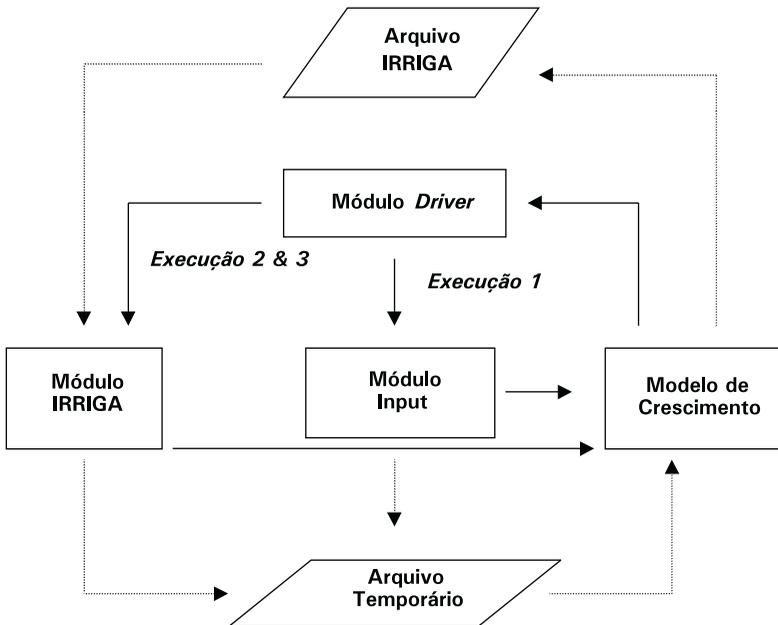


FIG. 1. Diagrama do modelo modificado CROPGRO para manejo de irrigação com sistema pivô central.

Essas modificações incluem a adição de uma nova sub-rotina no modelo, a criação de um novo módulo de entrada de dados (IRRIGA) e modificações no módulo *driver*. A nova sub-rotina foi adicionada no módulo que executa a simulação para armazenar todas as datas de irrigação em um novo arquivo temporário denominado IRRIGA.DAT, no final da primeira execução do modelo. Introduziu-se uma restrição no módulo *driver*, que é implementada quando o

número de tratamentos ou número de dias que o equipamento requer para completar uma revolução é maior que um.

O novo módulo, denominado IRRIGA, tem como objetivo ler as datas de irrigação do arquivo temporário, que é criado no final da primeira execução do modelo. Esse módulo também adiciona um ou mais dias para o equipamento completar uma revolução, conforme o manejo de irrigação adotado, e cria um novo arquivo temporário (IBSNAT35.INP), que inclui as novas datas de irrigação baseadas no manejo obtido na primeira sessão da área a ser irrigada. Essas modificações também permitem o uso de dois ou mais tipos de solo e culturas em diferentes segmentos da área a ser irrigada pelo sistema pivô central.

Os intervalos entre o início e o término das irrigações podem afetar o rendimento da cultura, em função da localização das plantas no campo, ou seja, as plantas nos extremos, início da área irrigada e final da área irrigada são as primeiras e as últimas a receberem água. Para se considerar uma possível diferença no rendimento entre a primeira parcela da área a ser irrigada e as demais parcelas, a produtividade e a lâmina total aplicada foram simuladas para cada parcela irrigada conforme o turno de rega adotado. Informações adicionais sobre as diferentes opções de frequências de irrigação são encontradas nos itens seguintes.

Condições locais

O modelo BEANGRO, versão 1.02, foi calibrado e validado para Londrina por Faria et al. (1997b). Os coeficientes genéticos da variedade IAPAR 57, largamente cultivada na região, foram obtidos utilizando-se dados de campo de diferentes épocas de plantio e manejos de irrigação. Rendimentos simulados de feijão mostraram uma boa comparação com os dados observados para as diferentes épocas de plantio e manejos de irrigação para Londrina. Os coeficientes de determinação (R^2) entre os dados simulados e observados para maturidade fisiológica, biomassa e rendimento foram 0,82, 0,70 e 0,91, respectivamente (Faria et al., 1997b). As informações climáticas requeridas pelo modelo CROPGRO foram obtidas na estação meteorológica do Instituto Agrônomo do Paraná-IAPAR, localizada em Londrina (Latitude 23,45° S, Longitude 51,95° W). Essa região possui um clima caracterizado como subtropical úmido, com a precipitação variando de 1200 a 1900 mm, sendo que 2/3 da precipitação total ocorre durante a primavera e o verão, ou seja, de

outubro a março. Os parâmetros climáticos utilizados no modelo CROPGRO incluem dados históricos do período de 1976 a 1997 de precipitação, temperaturas máxima e mínima e radiação solar, cujas médias mensais para os 22 anos da série histórica são ilustradas na Figura 2.

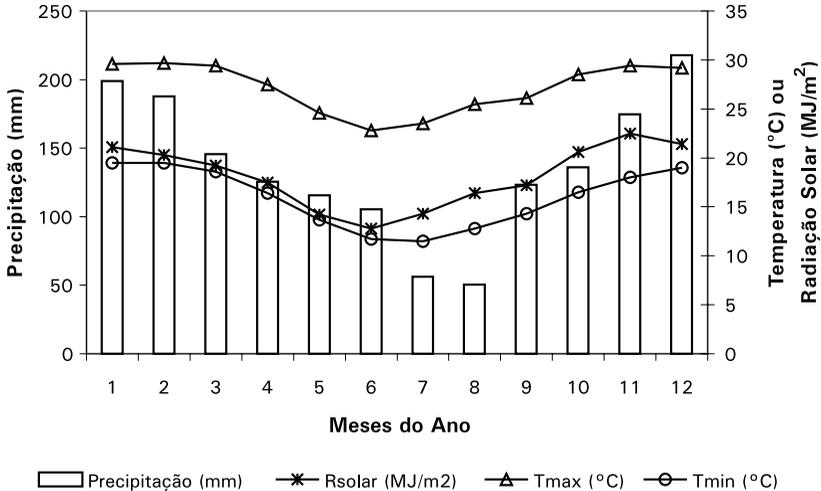


FIG. 2. Média mensal das temperaturas máximas (Tmax) e mínimas (Tmin), radiação solar (Rsolar) e precipitação para 22 anos de dados históricos (1976-1997).

Os dados de solo usados como entrada no modelo são apresentados na Tabela 1, sendo obtidos por análises realizadas em campo, na Estação Experimental do IAPAR, em Londrina (Faria et al., 1994). O solo, classificado como Latossolo Roxo, é caracterizado pelo alto teor de argila (40 a 60%), um perfil profundo, alta taxa de infiltração, lençol freático profundo e baixa quantidade de matéria orgânica.

Os dados de entrada no modelo para as práticas culturais incluem: espaçamento entre linhas de plantio igual a 0,5 m, densidade de plantio de 24 plantas m⁻² e data de semeadura em 15 de agosto. Foram utilizados os coeficientes genéticos obtidos por Faria et al. (1997b) para simular o crescimento e desenvolvimento da cultivar de feijão IAPAR 57.

Tabela 1. Características do Latossolo Roxo de Londrina, Paraná.

Profundidade (cm)	Parâmetros do Solo					
	SLL ($m^3 m^{-3}$)	SDUL ($m^3 m^{-3}$)	SSAT ($m^3 m^{-3}$)	SBDM ($mg m^{-3}$)	SSKS ($cm h^{-1}$)	SRGF
0-10	0,20	0,35	0,43	1,1	1,9	1,00
10-25	0,27	0,38	0,43	1,0	1,9	0,25
25-40	0,27	0,38	0,43	1,0	1,9	0,25
40-55	0,27	0,36	0,43	1,0	1,9	0,10
55-70	0,27	0,36	0,43	1,0	1,9	0,10
70-130	0,27	0,36	0,43	0,9	1,9	0,00

SLL - Ponto de murcha permanente

SDUL - "Capacidade de campo"

SSAT - Quantidade de água no solo saturado

SBDM - Densidade do solo

SSKS - Condutividade hidráulica em solo saturado

SRGF - Fator de crescimento de raiz

Características das estratégias de irrigação

Na região de Londrina, o sistema de irrigação mais utilizado é o pivô central, geralmente com capacidade de aplicação de água variando de 5 a 7 mm dia⁻¹, o que é equivalente a uma vazão de 125 a 175 m³ h⁻¹ para uma área irrigada de 60 ha. Uma vantagem desse sistema de irrigação é a possibilidade de se aplicarem diferentes lâminas de água pelo ajuste da velocidade de rotação.

Neste estudo, sistemas de irrigação pivô central com diferentes capacidades de aplicação de água (5, 6 e 7 mm dia⁻¹) foram considerados para determinar as estratégias de irrigação que otimizam a renda líquida do feijão na região de Londrina, Paraná. Para cada sistema, os três seguintes turnos de rega foram analisados:

- irrigar toda a área em um dia, aplicando-se lâminas de 5, 6 e 7 mm. Neste caso, assume-se que toda a área irrigada terá o mesmo teor de umidade do solo (Figura 3a);
- irrigar toda a área em dois dias, aplicando-se lâminas de 10, 12 e 14 mm devido à redução na velocidade de rotação do equipamento pela metade. Neste caso, haverá duas seções de 30 ha, podendo cada seção ter diferente valor de umidade do solo devido às diferenças no tempo em que a irrigação ocorreu em cada seção (Figura 3b);

- c) irrigar toda a área em três dias, aplicando-se lâminas de 15, 18 e 21 mm. Neste caso, haverá três seções de 20 ha, podendo cada seção ter distintos valores de umidade do solo (Figura 3c).

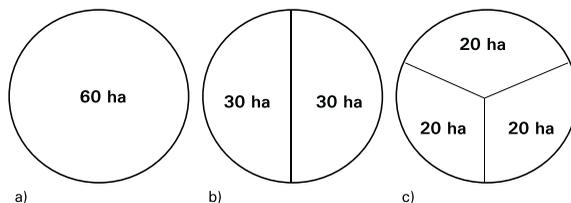


FIG. 3. Diferentes estratégias de irrigação simuladas com o modelo modificado CROPGRO, para irrigação da área em um dia (a), dois dias (b) e três dias (c).

As estratégias de irrigação utilizadas neste estudo, correspondentes aos sistemas pivô central com três capacidades de aplicação de água e operados com três velocidades de rotação, foram resumidas na Tabela 2.

Tabela 2. Lâminas de irrigação resultantes das diferentes estratégias de irrigação simuladas.

	<i>Tempo de revolução do pivô central</i>		
	<i>1 dia</i>	<i>2 dias</i>	<i>3 dias</i>
Capacidade de	5	10	15
Aplicação	6	12	18
(mm)	7	14	21

O momento de irrigação foi definido de acordo com os diferentes níveis críticos de umidade remanescentes da fração de água disponível no solo (CAD), considerando-se a profundidade de 30 cm do perfil do solo. Foram considerados seis níveis críticos de umidade, ou seja, de 40 a 90% da CAD, em intervalos de 10%. A lâmina de água aplicada depende do turno de rega, isto é, um, dois ou três dias para cada pivô central. Para cada estratégia de simulação, o valor da umidade inicial do solo foi ajustado para a capacidade de campo e as simulações foram iniciadas no dia de plantio.

Neste estudo, após atingir o nível crítico de umidade do solo preconizado como critério para a aplicação de irrigação, considerou-se que todas as seções seriam

irrigadas, mesmo com a ocorrência de precipitação após a irrigação da 1ª ou 2ª seções, ou seja, não se encerrará a irrigação mesmo que isso implique em irrigar em um dia com chuva. Normalmente, a probabilidade de chuva para dois ou três dias é desconhecida ou insuficiente para tomadas de decisões no manejo de irrigação.

Critério de decisão

Neste estudo, a função objetivo foi a maximização da renda líquida (NP), conforme equação (2):

$$NP = \max\{P \cdot Y_{(d,i)} - Ct_{(d,i)}\} \quad (2)$$

sendo, P o preço do produto, em US\$ kg⁻¹, Y o rendimento de grãos simulado pelo modelo para cada ano dos dados climáticos utilizados, em kg ha⁻¹, C_t o custo total, a ser definido na equação (3), d é um elemento de {d₁, d₂, ..., d_n} e representa os diferentes níveis críticos de umidades do solo, variando de 40 a 90% da CAD, e i um elemento de {i₁, i₂, ..., i_n} representando os estados da natureza (anos de simulações variando de 1976 a 1997).

A renda líquida foi considerada como o principal critério de decisão, sendo definida como a renda bruta, correspondente ao produto da produtividade pelo valor do produto (*commodity*), menos o custo de produção. O custo de produção (C_p) foi dividido em custo fixo (C_o), associado aos custos básicos de produção da cultura e ao custo da irrigação (C_i), dados em US\$ ha⁻¹, ou seja (equação 3):

$$C_t = C_o + C_i \quad (3)$$

O custo da irrigação (C_i) foi definido pela seguinte relação (equação 4):

$$C_i = C_c + (C_e \cdot D + C_w \cdot D) \quad (4)$$

sendo C_c o custo anual do capital investido nos equipamentos de irrigação (US\$ ha⁻¹), C_e o custo operacional da irrigação, incluindo o preço do bombeamento (US\$ mm⁻¹), C_w o custo da água (US\$ mm⁻¹) e D a lâmina total de irrigação aplicada durante o ciclo da cultura, em mm.

O valor de C_o, obtido de Faria et al. (1997a), foi de US\$ 341,67 ha⁻¹, e o custo anual do capital (C_c), obtido de Frizzone et al. (1994), foi de US\$ 121,67 ha⁻¹.

O custo anual do capital incluiu a depreciação sobre dez anos e juros de 12% ao ano. Os componentes do C_e incluíram a energia e os custos operacionais. O valor de C_e foi de US\$ 0,42 mm^{-1} , obtido de Faria et al. (1997a). Esse valor foi baseado na média de vários projetos de irrigação que utilizaram pivôs centrais. O valor de C_w foi considerado nulo por não haver cobrança de tarifa de uso de água quando ela é retirada de rios e/ou represas. O custo anual do capital investido nos equipamentos de irrigação (C_c) foi considerado o mesmo para os três sistemas pivô central de diferentes capacidades de aplicação.

Três análises foram realizadas utilizando-se três diferentes preços do produto. Na primeira análise, o preço do produto foi US\$ 0,42 kg, o mais baixo no período de dez anos, entre 1989 até 1998. Na segunda análise, o preço do produto foi US\$ 0,72 kg, representando a média dos dez anos. Na terceira análise, o preço foi US\$ 1,04 kg, o mais alto da série de dez anos. Esses preços foram baseados nos preços históricos do produto para o Estado do Paraná (Agriannual, 1998).

Resultados e Discussão

Produtividade dos grãos do feijoeiro

Os resultados demonstraram significativos ganhos de rendimento de grãos de feijão com o aumento do nível crítico de umidade do solo, especialmente entre 40 e 60% da CAD. Os níveis críticos de umidade do solo foram importantes na determinação dos mais altos rendimentos como mostra a Figura 4. As necessidades de irrigação para manter a umidade do solo acima do nível crítico de umidade preconizado em cada estratégia aumentaram com o aumento do nível crítico de umidade do solo, independentemente do tempo de revolução do pivô central (Figura 4). Com o aumento do nível crítico de umidade do solo, as médias das produtividades tenderam a se manter constantes para os sistemas pivô central estudados. O efeito da velocidade de rotação dos sistemas de irrigação ocorreu somente sob baixos valores de umidade crítica do solo.

Na análise da produtividade, a melhor estratégia de irrigação foi definida como aquela que proporciona o mais alto rendimento de grãos de feijão. Para um nível crítico de umidade do solo de 40% da CAD, o melhor turno de rega foi irrigar toda a área em três dias, para os sistemas com capacidades de aplicação de 6 e 7 mm dia^{-1} . Para 50% da CAD, o melhor turno de rega foi irrigar toda a área em dois dias, com um sistema cuja capacidade de aplicação foi de 7 mm dia^{-1} . Para 60% da CAD, o melhor turno de rega foi irrigar toda a área em um dia, utilizando-se um

sistema pivô central com capacidade de 6 e 7 mm dia⁻¹, resultando em produtividades máximas de 2,94 t ha⁻¹. A diferença entre os equipamentos foi somente o número de irrigações aplicadas durante o ciclo total da cultura, sendo 32 e 27 aplicações, respectivamente. Para um nível crítico de umidade do solo de 70% da CAD, o turno de rega que apresentou o melhor rendimento de grãos foi também irrigar toda a área em um dia, com os sistemas com capacidade de aplicação de 6 e 7 mm dia⁻¹. A produtividade média para ambos foi de 3,05 t ha⁻¹, sendo apenas 3% maior que a produtividade para o nível crítico de umidade do solo de 60% da CAD. Entretanto, o número de irrigações foi de 39 para uma lâmina de 234 mm e 35 para uma lâmina de 242 mm, para os equipamentos de 6 e 7 mm dia⁻¹, respectivamente. Para 80% da CAD, o melhor turno de rega foi irrigar toda a área em um dia, com os sistemas que aplicaram 6 e 7 mm dia⁻¹. A máxima produtividade foi de 3,07 t ha⁻¹, sendo apenas 0,6% maior que a produtividade para o nível crítico de umidade do solo de 70% da CAD. O número médio de irrigações foi de 47 para uma lâmina de 285 mm e de 42 para uma lâmina de 294 mm, respectivamente. Para 90% da CAD, o melhor turno de rega foi irrigar toda a área em um dia, sendo que a produtividade média foi a mesma para os três sistemas de irrigação analisados, isto é, 3,08 t ha⁻¹. Para os sistemas de irrigação de 6 e 7 mm dia⁻¹ a produtividade aumentou somente 0,3%. O número médio de irrigações foi de 64 para uma lâmina de 320 mm, de 57 para uma lâmina de 341 mm e de 52 para uma lâmina de 362 mm, para os equipamentos com capacidade de aplicação de 5, 6 e 7 mm dia⁻¹, respectivamente.

Para os três sistemas pivô central analisados neste estudo, o turno de rega de três dias apresentou a menor produtividade quando o nível crítico de umidade do solo foi maior que 40% da CAD. Nas condições climáticas da região de Londrina, clima subtropical úmido, a demanda de água pelas plantas aumenta em setembro e em outubro, devido ao aumento da temperatura e da radiação solar (Figura 2). Um atraso de um ou dois dias na irrigação em uma determinada seção da área irrigada aumenta a deficiência de água no solo e pode ocasionar a redução na produtividade.

Renda líquida

Nesta análise, a melhor estratégia para o agricultor é aquela que proporciona a máxima renda líquida. Pelo fato de essa renda ser função do preço do produto, foi analisado o seu impacto em três diferentes preços. A Tabela 3 apresenta os resultados das rendas líquidas em função dos níveis críticos de umidade do solo de 70 e 80% da CAD, da capacidade de aplicação dos equipamentos pivô central e do turno de rega.

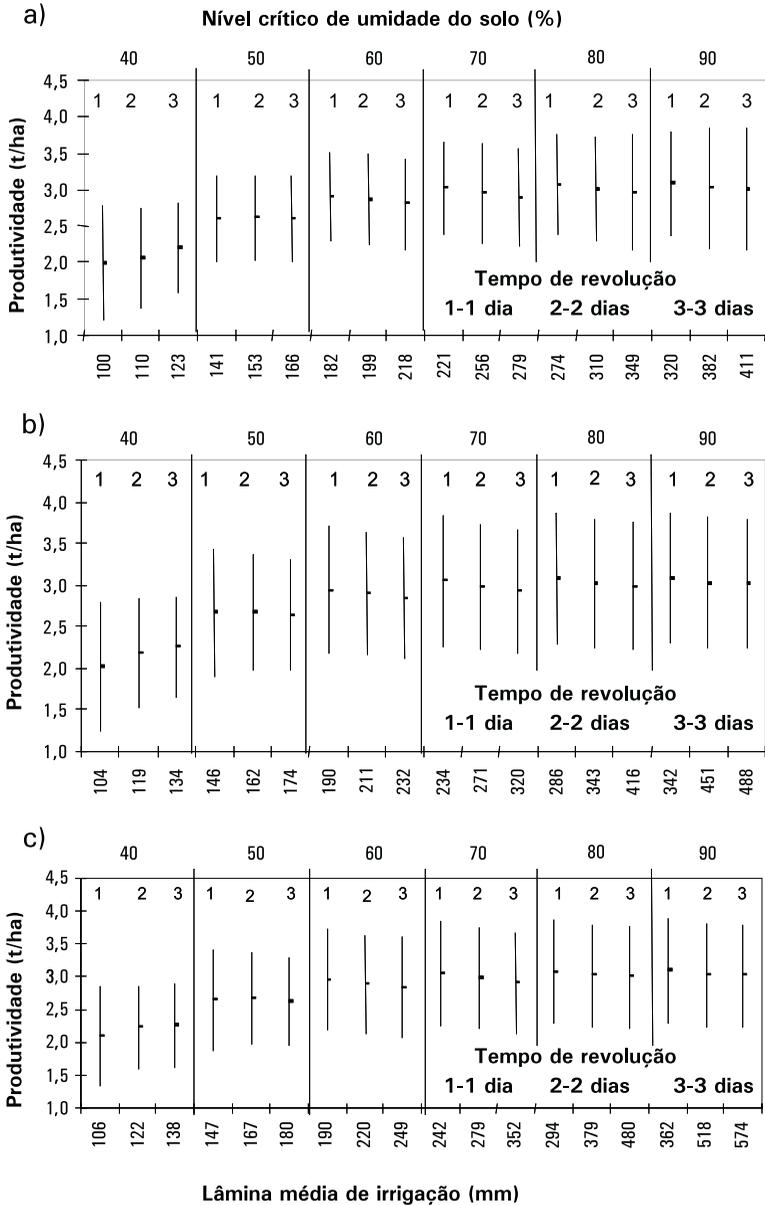


FIG. 4. Produtividade média de grãos de feijão (ponto) e desvio padrão (barra) simulados para pivô central com capacidades de aplicação de 5 mm dia⁻¹ (a), 6 mm dia⁻¹ (b) e 7 mm dia⁻¹ (c), operados em três tempos de revolução, em função do nível crítico de umidade do solo e lâmina aplicada.

Tabela 3. Melhores resultados de estratégias de irrigação para Londrina, Paraná, Brasil.

Turno de rega	Capacidade de aplicação, mm dia ¹	Umidade crítica, %	Lâmina, mm	N° de irrigações		Lâmina total aplicada, mm		Produtividade t ha ⁻¹		Renda líquida US\$ ha ⁻¹					
				x	SD	x	SD	x	SD	Menor Preço		Preço Médio		Maior Preço	
										\bar{x}	SD	\bar{x}	SD	\bar{x}	SD
1 dia	5	70	5	44	13	221	64	3,01	0,78	892	376	1615	563	2580	813
2 dias	5	70	10	26	7	256	68	2,96	0,75	848	365	1557	546	2503	788
3 dias	5	70	15	19	4	279	67	2,88	0,74	803	355	1496	533	2419	770
1 dia	5	80	5	55	14	274	68	3,06	0,79	892	381	1627	571	2607	824
2 dias	5	80	10	31	7	310	72	3,00	0,77	849	374	1570	560	2532	808
3 dias	5	80	15	23	5	349	79	2,96	0,75	803	355	1520	551	2467	794
1 dia	6	70	6	39	11	234	67	3,05	0,78	900	377	1631	565	2606	816
2 dias	6	70	12	23	6	271	70	2,97	0,76	849	368	1562	551	2513	795
3 dias	6	70	18	18	4	320	76	2,93	0,74	807	360	1509	539	2446	778
1 dia	6	80	6	48	12	286	70	3,07	0,79	891	382	1629	572	2612	826
2 dias	6	80	12	29	7	343	78	3,01	0,78	839	376	1563	562	2528	811
3 dias	6	80	18	23	5	416	94	2,98	0,76	792	374	1508	557	2462	802
1 dia	7	70	7	35	10	242	69	3,05	0,79	900	379	1631	568	2607	820
2 dias	7	70	14	20	5	279	71	2,97	0,76	845	364	1558	546	2508	790
3 dias	7	70	21	17	5	352	100	2,90	0,77	782	377	1480	563	2409	802
1 dia	7	80	7	42	10	294	70	3,07	0,79	889	382	1627	572	2611	826
2 dias	7	80	14	27	6	379	87	3,01	0,78	824	376	1548	562	2513	811
3 dias	7	80	21	23	5	480	108	2,99	0,77	769	377	1486	561	2443	807

menor preço – US\$ 0,48kg⁻¹, preço médio – US\$ 0,72kg⁻¹ e maior preço – US\$ 1,04kg⁻¹

\bar{x} - média

SD – desvio padrão

Menor preço do produto

Para o sistema de irrigação com capacidade de aplicação de 5 mm dia⁻¹, o melhor turno de rega foi irrigar toda a área em um dia, com o nível de umidade crítica do solo de 70 e 80% da CAD (Tabela 3). Pela Figura 5a observa-se que não há diferença na renda líquida (US\$ 892 ha⁻¹) entre os níveis críticos de umidade do solo de 70 e 80% da CAD. Para 70% da CAD, a produtividade foi de 3,01 t ha⁻¹, com um número médio de 44 irrigações e a lâmina aplicada de 221 mm. Para 80% da CAD, a produtividade foi de 3,0 t ha⁻¹, o número médio de irrigações de 55 e a lâmina média aplicada de 274 mm. Para um aumento na produtividade de 1,6% foi necessário aplicar 19,3% a mais de água, e isto não ocasionou mudanças na renda líquida.

Os equipamentos com capacidade de 6 e 7 mm dia⁻¹ proporcionaram as mesmas produtividades e rendas líquidas. O melhor turno de rega para os dois sistemas foi irrigar toda a área em um dia, quando o nível crítico de umidade do solo foi de 70% da CAD (Figura 5a). O número médio de irrigações foi de 39 e de 35, e a lâmina aplicada de 234 mm e de 242 mm para os equipamentos de 6 e 7 mm dia⁻¹, respectivamente.

Preço médio do produto

Para o equipamento que aplicou 5 mm dia⁻¹, o melhor turno de rega foi irrigar toda a área em um dia, para um nível crítico de umidade de solo de 80% da CAD (Figura 5b). Esse sistema proporcionou uma renda líquida média de US\$ 1.627 ha⁻¹. Para os sistemas de 6 e 7 mm dia⁻¹, o melhor turno de rega também foi irrigar toda a área em um dia, quando o nível crítico de umidade do solo foi de 70% da CAD. Ambos os sistemas apresentaram uma renda líquida de US\$ 1.631 ha⁻¹.

Maior preço do produto

Para o equipamento de 5 mm dia⁻¹, o melhor turno de rega foi irrigar toda a área em um dia para um nível crítico de umidade de 80 e 90% da CAD (Figura 5c). Para esses níveis críticos de umidade do solo, não houve diferença na renda líquida, sendo de US\$ 2.607 ha⁻¹. Para o nível crítico de umidade do solo de 80 e 90% da CAD, a produtividade foi de 3,06 e de 3,08 t ha⁻¹, com lâminas totais de 274 e de 320 mm para 55 e 65 aplicações de irrigação, respectivamente. Para um aumento na produtividade de 0,65%, aplicou-se 14% a mais de água.

Para os equipamentos de 6 e 7 mm dia⁻¹, o melhor turno de rega foi irrigar toda a área em um dia, quando o nível crítico de umidade do solo foi de 80% da CAD. Neste caso, a renda líquida média, a produtividade, o número de irrigações e a lâmina aplicada foram de US\$ 2.612 ha⁻¹, 3,07 t ha⁻¹, 48 e 286 mm para o equipamento de 6 mm dia⁻¹ e US\$ 2.611 ha⁻¹, 3,07 t ha⁻¹, 42 e 294 mm para o equipamento de 7 mm dia⁻¹.

Variações nas lâminas totais aplicadas

Neste estudo, as lâminas aplicadas variaram entre 221 e 320 mm para as melhores estratégias. Esses resultados são próximos às lâminas de irrigação obtidas por Faria et al. (1997a), isto é, 230 a 330 mm, em experimentos de campo conduzidos em Londrina. Queiroz et al. (1996) e Saad (1996) encontraram as mesmas variações nas lâminas totais de irrigação para o feijão em outras regiões do Brasil.

As variações nas lâminas totais de irrigação resultam das diferentes necessidades hídricas da cultura nos diferentes anos analisados (1976 - 1997), devido à variabilidade na distribuição e intensidade das precipitações, assim como na evapotranspiração potencial. Os fatores climáticos, precipitação, temperaturas máxima e mínima e radiação solar também são os responsáveis pelos altos valores do desvio padrão encontrados para o rendimento de grãos e, conseqüentemente, na renda líquida.

O número de irrigações para as estratégias consideradas economicamente ótimas não correspondeu aos números observados em condições de campo. Uma das razões para essa discrepância é que o modelo de simulação não considera os danos causados por insetos e doenças, embora o feijão seja suscetível a vários patógenos. Além disso, os valores econômicos para os sistemas de irrigação pivô central utilizados neste estudo correspondem à média dos custos operacionais para esses sistemas. O número de irrigações entre 34 e 64 por ciclo da cultura, como sugerido pelas simulações, irá elevar os custos de manutenção e operacional do sistema de irrigação.

A maior renda líquida determinada neste estudo sugere a irrigação de toda a área em um dia, quando o nível crítico de umidade do solo foi de 70 e 80% da CAD (Tabela 3). A importância do preço do produto na determinação da renda líquida do agricultor, comparada à produtividade e aos custos de produção do feijão é

mostrada na Tabela 3. Para o menor preço e o preço médio do produto, o sistema de irrigação que proporcionou as maiores rendas líquidas foram aqueles com capacidade de aplicação de 6 e 7 mm dia⁻¹, irrigando quando o nível crítico de umidade do solo foi de 70% da CAD. Entretanto, o equipamento com a capacidade de aplicação de 7 mm dia⁻¹ utilizou 17% a mais de água. Para o maior preço do produto, a maior renda líquida foi obtida com o equipamento com capacidade de 6 mm dia⁻¹, quando o nível crítico de umidade do solo foi de 80% da CAD.

Este estudo demonstrou que o sistema de irrigação ótimo para o feijão, na região de Londrina, é aquele que apresenta uma capacidade de aplicação de água de 6 mm dia⁻¹, baseando-se nas condições ambientais e de manejo utilizados. Esse sistema possui uma vazão de 150 m³ h⁻¹, isto é, 25 m³ h⁻¹ a menos que o equipamento que aplica 7 mm dia⁻¹. Apesar dos baixos custos de irrigação, o agricultor que adquirir um equipamento que aplique 6 mm dia⁻¹ poderá economizar comprando diâmetros menores de tubulações para a adutora e um sistema de bombeamento menor. Esse sistema permitirá ao agricultor obter, pelo menos, a mesma renda líquida obtida com o equipamento com capacidade de 7 mm dia⁻¹.

Conclusões

As modificações realizadas no modelo de simulação CROPGRO permitiram considerar o número de dias necessários ao pivô central para completar uma revolução. O modelo modificado foi usado para determinar a estratégia ótima de irrigação para a cultura do feijão, na região de Londrina, Paraná. O sistema pivô central com capacidade de aplicação de 6 mm dia⁻¹ foi considerado o que fornece as melhores condições para se obter a renda líquida ótima. Para este estudo, a melhor estratégia foi irrigar quando o nível crítico de umidade do solo atingiu 70% da CAD para o menor preço e preço médio do produto, e 80% da CAD para o maior preço do produto. O turno de rega que apresentou as maiores produtividades foi irrigar toda a área em um dia, minimizando o estresse hídrico durante o ciclo da cultura.

Futuras pesquisas são necessárias para avaliar diferentes condições climáticas e solos para tornar o modelo de simulação CROPGRO modificado aplicável a diferentes regiões. Há, também, a necessidade de se incluírem modificações no modelo CROPGRO para permitir que ele execute análises de estratégias de irrigação em tempo real, considerando-se o tempo de revolução do sistema de irrigação pivô central.

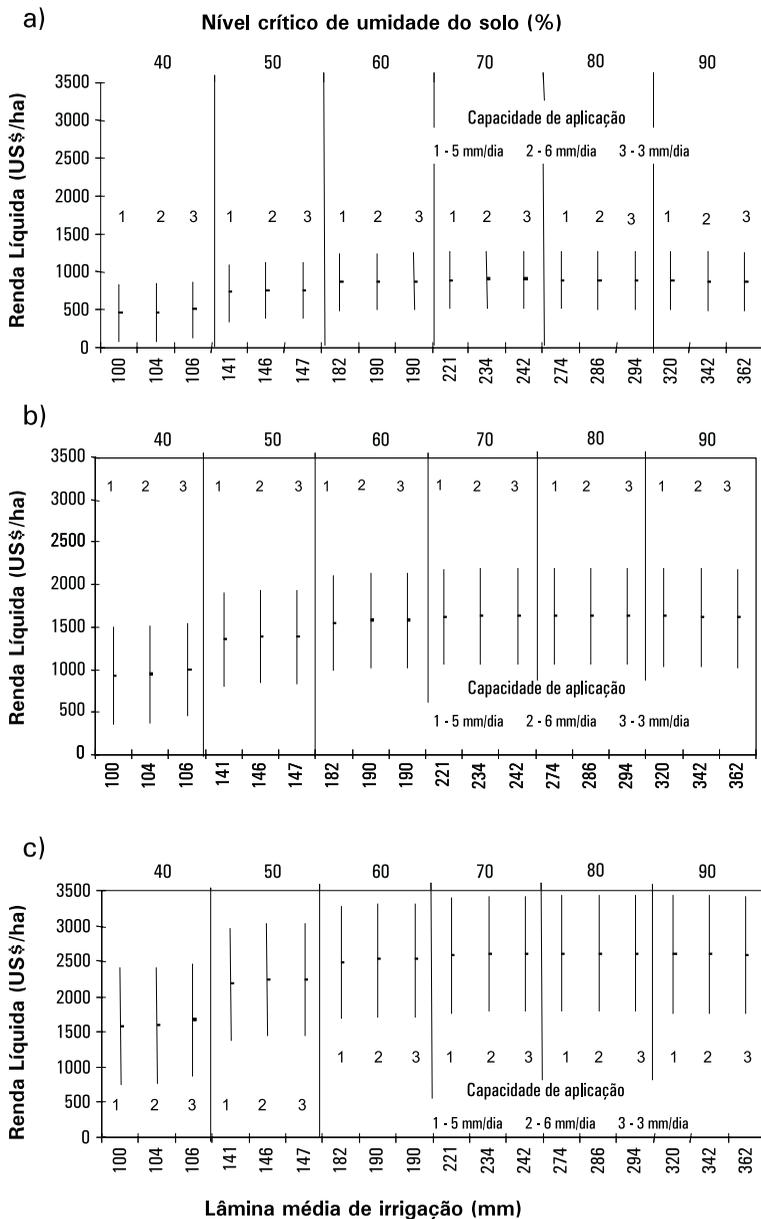


FIG. 5. Renda líquida média (ponto) e desvio padrão (barra) simulados para sistemas pivô central com capacidade de aplicação de 5, 6 e 7 mm dia⁻¹ e turno de rega de um dia para o menor (a), médio (b) e maior (c) preço do produto, em função do nível crítico de umidade do solo e lâmina aplicada.

Referências Bibliográficas

AGRIANUAL: ANUÁRIO DA AGRICULTURA BRASILEIRA. São Paulo: FNP Consultoria & Comercio, 1998. p. 247-253.

BOGGESS, W. G.; RITCHIE J. T. Economic and risk analysis of irrigation decisions in humid regions. **Journal of Production Agriculture**, Madison, v. 1, n. 2, p. 116-122, 1988.

BOGGESS, W. G.; LYNNE, G. G.; JONES J. W; SWANEY D. P. Risk-return assessment of irrigation decisions in humid regions. **Southern Journal of Agricultural Economics**, Clemson, v. 15, n. 1, p. 135-143, July 1983.

BOOTE, K. J.; JONES, J. W.; HOOGENBOOM, G.; WILKERSON, G. G. Evaluation of the CROPGRO-Soybean model over a wide range of experiments. In: KROPFF, M. J.; TENG, P. S.; AGGARWAL, P. K.; BOUMA, J.; BOUMAN, B. A. M.; JONES, J. W.; LAAR H. H. van (Ed.). **Applications of systems approaches at the field level**. Dordrecht: Kluwer, 1997. v. 2, p. 113-133.

BOOTE, K. J.; JONES J. W.; HOOGENBOOM, G. Simulation of crop growth: CROPGRO model. In: PEART, R. M.; CURRY, R. B. (Ed.). **Agricultural systems modeling and simulation**. New York: Marcel Dekker, 1998a. p. 651-692.

BOOTE, K. J.; JONES J. W.; HOOGENBOOM, G.; PICKERING, N. B. The CROPGRO model for grain legumes. In: TSUJI G. Y.; HOOGENBOOM, G.; THORNTON P. K. (Ed.). **Understanding options for agricultural production**. Dordrecht: Kluwer, 1998b. p. 99-127.

CARAMORI, P. H.; FARIA, R. T. de. **Frequência de períodos de 10 dias consecutivos com deficiência hídrica (veranicos) para Londrina e Ponta Grossa**. Londrina: IAPAR, 1987. 24 p. (IAPAR. Boletim Técnico, 20).

FARIA, R. T. de; MADRAMOOTOO, C. A.; BOISVERT, J.; PRASHER, S. O. Comparison of the versatile soil moisture budget and SWACROP models for a wheat crop in Brazil. **Canadian Agricultural Engineering**, Ottawa, v. 36, n. 2, p. 57-68, Apr./June 1994.

FARIA, R.T. de; FOLEGATTI, M. V.; FRIZZONE, J. A.; SAAD, A. M. Determination of a long-term optimal irrigation strategy for dry beans in Paraná State, Brazil. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 54, p. 155-164, jun. 1997a.

FARIA, R.T. de; OLIVEIRA D. de; FOLEGATTI M.V. Simulação da fenologia e produção do feijoeiro pelo modelo BEANGRO. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 10., 1997, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: SBA, 1997b. p. 140-142.

FRIZZONE, J. A.; BOTREL, T. A.; FREITAS, H. A. C. Análise comparativa dos custos de irrigação por pivô-central, em cultura de feijão, utilizando energia elétrica e óleo diesel. **Engenharia Rural**, Piracicaba, v. 5, n. 1, p. 34-53, jul. 1994.

GODWIN, D. C.; SINGH, U. Nitrogen balance and crop response to nitrogen in upland and lowland cropping systems. In: TSUJI, G. Y.; HOOGENBOOM, G.; THORNTON, P. K. (Ed.). **Understanding options for agricultural production**. Dordrecht: Kluwer, 1998. p. 55-77.

HEINEMANN, A.B. **Otimização do manejo da irrigação do feijoeiro comum utilizando o modelo CROPGRO**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão; Juiz de Fora: Embrapa Gado de Leite, 2003. 29 p. (Embrapa Arroz e Feijão. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 6).

HOOGENBOOM, G.; JONES, J. W.; BOOTE, K. J. Modeling growth, development, and yield of grain legumes using SOYGRO, PNUTGRO, and BEANGRO: a review. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 35, n. 6, p. 2043-2056, Nov./Dec. 1992.

HOOGENBOOM, G.; JONES, J. W.; WILKENS, P. W.; BATCHELOR, W. D.; BOWEN, W. T.; HUNT, L. A.; PICKERING, N. B.; SINGH, U.; GODWIN, D. C.; BAER, B.; BOOTE, K. J.; RITCHIE, J. T.; WHITE, J. W. Crop models. In: TSUJI, G. Y.; UEHARA, G.; BALAS, S. (Ed.). **DSSAT version 3**. Honolulu: University of Hawaii, 1994, v. 2, p. 95-244.

HOOGENBOOM, G.; WILKENS, P. W.; THORNTON, P. K.; JONES, J. W.; HUNT, L. A.; IMAMURA, D. T. Decision support system for agrotechnology transfer v. 3.5. In: HOOGENBOOM, G.; WILKENS, P. W.; TSUJI, G. Y. (Ed.). **DSSAT version 3**. Honolulu: University of Hawaii, 1999. v. 4, p. 2-36.

JONES, J. W.; RITCHIE J. T. Crop growth models. In: HOFFMAN G. J.; HOWELL, T. A.; SOLOMON, K. H. (Ed.). **Management of farm irrigation systems**. St. Joseph: ASAE, 1990. p. 63-89.

JONES, J. W.; TSUJI, G. Y.; HOOGENBOOM, G.; HUNT, L. A.; THORNTON, P. K.; WILKENS, P. W.; IMAMURA, D. T.; BOWEN, W. T. Decision support system for agrotechnology transfer: DSSAT v.3. In: TSUJI, G. Y.; HOOGENBOOM, G.; THORNTON, P. K. (Ed.). **Understanding options for agricultural production**. Dordrecht: Kluwer, 1998. p. 157-177.

KEATING, B.; GRACE P. Using biophysical simulation models to assess the performance of agricultural systems in risky environments. In: WORKSHOP RISK MANAGEMENT FOR MAIZE FARMERS IN DROUGHT-PRONE AREAS OF SOUTHERN AFRICA, 1997, Kadoma Ranch, Zimbabwe. **Proceedings...** Mexico: CIMMYT, 1999. p. 67-81.

LAING, D. R.; JONES, P. G.; DAVIS, J. H. C. Common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). In: GOLDWORTHY, P. R.; FISHER, N. M. (Ed.). **The physiology of tropical field crops**. New York: J. Wiley, 1984. p. 305-351.

MARTIN, E. C.; RITCHIE, J. T.; LOUDON, T. L. Use of the CERES-maize model to evaluate irrigation strategies for humid regions. In: NATIONAL CONFERENCE ON EVAPOTRANSPIRATION, 1985, Chicago. **Proceedings...** St. Joseph: ASAE, 1985. p. 342-350.

PRIESTLEY, C. H. B.; TAYLOR R. J. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. **Monthly Weather Review**, Boston, v. 100, n. 2, p. 81-92, Feb. 1972.

QUEIROZ, J. E.; CALHEIROS, C. B. M.; PESSOA, P. C. S.; FRIZZONE, J. A. Estratégias ótimas de irrigação do feijoeiro: terra como fator limitante da produção. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 31, n. 1, p. 55-61, jan. 1996.

RITCHIE, J. T. A user-oriented model of the soil water balance in wheat. In: DAY, W.; ATKIN, R. K. (Ed.). **Wheat growth and modeling**. New York: Plenum, 1985. p. 293-305.

RITCHIE, J. T. Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. **Water Resources Research**, Washington, v. 8, n. 5, p. 1204-1213, Oct. 1972.

RITCHIE, J. T. Soil water balance and plant water stress. In: TSUJI G. Y.; HOOGENBOOM, G.; THORNTON, P. K. (Ed.). **Understanding options for agricultural production**. Dordrecht: Kluwer, 1998. p. 41-54.

SAAD, A. M. **Déficit de irrigação como estratégia de manejo da água em feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.)**. 1996. 147 p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba.

SINGH, S. P.; GEPTS, P.; DEBOUCK, D. G. Races of common bean (*Phaseolus vulgaris*, Fabaceae). **Economic Botany**, New York, v. 45, n. 3, p. 379-396, July/Sept. 1991.

SMITH, R. C. G.; STEINER, J. L.; MEYER, W. S.; ERSKINE, D. Influence of season to season variability in weather on irrigation scheduling of wheat: a simulation study. **Irrigation Science**, New York, v. 6, p. 241-251, 1985.

TSUJI, G. Y.; HOOGENBOOM, G.; THORNTON, P. K. (Ed.). **Understanding options for agricultural production**. Dordrecht: Kluwer, 1998. 400 p.

TSUJI, G. Y.; UEHARA, G.; BALAS, S. **DSSAT version 3**. Honolulu: University of Hawaii, 1994. 3 v.

VILLALOBOS, F. J.; FERERES, E. A simulation model for irrigation scheduling under variable rainfall. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 32, n. 1, p. 181-188, Jan./Feb. 1989.

WHITE, J. W.; HOOGENBOOM, G.; JONES, J. W.; BOOTE, K. J. Evaluation of the dry bean model BEANGRO v1.01 for crop production research in a tropical environment. **Experimental Agriculture**, London, v. 31, n. 2, p. 241-254, Apr. 1995.

WILLIAMS, J. R. Runoff and water erosion. In: HANKS, R. J.; RITCHIE, J. T. (Ed.). **Modeling plant and soil system**. Madison: American Society of Agronomy, 1991. p. 439-455. (Agronomy Monograph, 31).

