

ALOCAÇÃO DE ÁGUA E COMBINAÇÃO DE ATIVIDADES PELA PROGRAMAÇÃO LINEAR EM UM PROJETO HIDROAGRÍCOLA NO MUNICÍPIO DE GUAÍRA (SP)

J.A. FRIZZONE; T.A. BOTREL; R.A.B. ARCE

Departamento de Engenharia Rural-ESALQ/USP, C.P. 9, CEP: 13418-900 - Piracicaba, SP

F.C. PÉRES

Departamento de Economia e Sociologia Rural-ESALQ/USP, C.P. 9, CEP: 13418-900 - Piracicaba, SP

RESUMO: Com o objetivo de desenvolver um modelo de programação linear para simular os níveis das atividades do processo de produção, utilizou-se o sistema de produção da fazenda Lagoa do Fogão, propriedade da família Sakai, localizada no município de Guaíra, SP, com um total de 207 ha irrigados por três sistemas de irrigação do tipo pivô-central. A função objetivo consistiu em maximizar o lucro da propriedade agrícola, utilizando as culturas de inverno tradicionalmente cultivadas nessa propriedade, sob regime de irrigação, a saber: tomate industrial, trigo, batata, ervilha e feijão. As restrições foram quanto à disponibilidade de terra, água e mercado. Os resultados obtidos, permitiram as seguintes conclusões: (a) na área sob o pivô-central 1 deve-se cultivar tomate (33 ha) e feijão (61 ha) e sob o pivô-central 2 deve-se cultivar feijão (64 ha); sob o pivô-central 3 não se cultivará com irrigação, pois não há disponibilidade de água; (b) Para aumentar a área irrigada sob o pivô-central 1, além de 94 ha até o limite de 100 ha, pode-se pagar até um máximo de US\$ 1.815,20 por hectare a mais; (c) Na área sob o pivô-central 2, permitiu-se cultivar 64 ha de feijão, consumindo-se toda a água disponível, isto é, 125 dm.ha. Para maiores valores de utilização de água, pode-se pagar no máximo US\$ 921,42 por 1000 m³ de água utilizados a mais.

Descritores: programação linear, alocação de água, pivô-central

WATER ALLOCATION AND ACTIVITY COMBINATION IN A HYDRO-AGRICULTURAL PROJECT IN GUAÍRA COUNTY (SP), USING LINEAR PROGRAMMING

ABSTRACT: In order to develop a linear programming model to simulate the activity level which optimizes irrigation, this paper uses data of the farm "Lagoa do Fogão", owned by the Sakai family, in the Guaíra (SP) county, of which 207 ha are irrigated by three center-pivot systems. The objective functions consisted in maximizing the net income of the farm. Winter crops usually cultivated under irrigation in this farm are: industrial tomatoes, wheat, potatoes, peas and beans. The restrictions to the objective function were area, water and markets. The following was concluded: (a) In the area under center-pivot 1, tomatoes (33 ha) and beans (61 ha) should be cultivated; under center-pivot 2, beans (64 ha), and under center-pivot 3 there should be no cultivation with irrigation due to lack of water. (b) To increase the irrigated area under center-pivot 1 beyond the 94 ha until 100 ha, a maximum of US\$ 1,815.20 for each extra hectare, may be paid. (c) In the area under center-pivot 2, it was possible to grow 64 ha of beans, using all the available water, that is 125 dm.ha. For the use of higher water amount, the maximum expenditure may come up to US\$ 921.42 for each extra 1000 m³ used.

Key Words: linear programming, water allocation, center-pivot

INTRODUÇÃO

O município de Guaíra (SP) atualmente desenvolve uma agricultura irrigada baseada na utilização de sistemas de irrigação por aspersão do tipo pivô-central, contando com mais de 15000 ha irrigados. Parte desse desenvolvimento foi possibilitado pela disponibilidade de recursos hídricos, representada pela contribuição das bacias dos rios Pardo e Sapucaí e condições edáficas e topográficas favoráveis. Apesar de ocupar essa

posição privilegiada, a prática da irrigação tem sido dificultada pela falta de planejamento na implantação dos sistemas de irrigação, resultando na escassez do recurso hídrico, ou dificuldades na captação de água devido a inadequada localização dos sistemas de irrigação. Isso ocorre principalmente com os usuários que possuem suas estações de bombeamento localizadas nos afluentes das bacias de drenagem citadas. É comum nessa região a ocorrência de sistemas de irrigação ociosos, por serem adquiridos sem um prévio

conhecimento da disponibilidade real de água na propriedade. Neste contexto, encontra-se a propriedade agrícola Lagoa do Fogão, que possui três sistemas de irrigação do tipo pivô-central, abastecidos por um conjunto de reservatórios, cuja capacidade de armazenamento de água é menor que o volume requerido pelos três pivôs-centrais, no período de maior demanda hídrica. Conhecendo a natureza do problema dessa propriedade, faz-se necessário adotar medidas que possibilitem o planejamento do uso da água, auxiliando o agricultor na tomada de decisão, tendo como objetivo a maximização do lucro, dadas as restrições existentes.

Os métodos de análise utilizados para resolver os problemas de alocação de recursos podem ser vários. As decisões baseadas no julgamento e na intuição podem ser satisfatórias quando o número de fatores do problema é limitado e suas relações são claras. Em situações nas quais o número de fatores envolvido é grande, faz-se necessário a utilização de modelos matemáticos (RAO *et al.*, 1988; BERNARDO *et al.*, 1988), os quais permitem representar alternativas de solução ou simular condições reais que poderiam ocorrer. A programação linear é apropriada para problemas complexos de alocação que não podem ser resolvidos satisfatoriamente com técnicas analíticas convencionais (BOSCH *et al.*, 1986; HILLIER & LIEBERMAN, 1988; BERNARDO *et al.*, 1988; BULLER *et al.*, 1991).

A programação linear e suas extensões são métodos matemáticos que se vêm desenvolvendo e aperfeiçoando nos últimos anos. Procura-se, entre outros objetivos, resolver o problema fundamental da economia de alocação ótima de recursos, visando encontrar a melhor distribuição de acordo com determinado objetivo e os meios de produção disponíveis em quantidades limitadas pelas várias formas possíveis de utilização (NEVES *et al.*, 1984; BOSCH *et al.*, 1986; BENEDINI, 1988; LEBDI *et al.*, 1990). Segundo PALACIOS VELEZ (1977), a distribuição irregular dos recursos hídricos e a escassez de capital justificam a utilização de técnicas de programação matemática, as quais permitem aumentar a lucratividade nas áreas irrigadas. HUANG *et al.* (1975), desenvolveram um modelo de programação linear para uso ótimo da água num sistema de barragens armazenadoras. O modelo mostrou que o uso eficiente da água e o incremento da produção podem ser obtidos através de mudanças nas datas de semeadura das culturas, com o objetivo de

evitar que as demandas máximas de água das culturas coincidam num mesmo período.

O objetivo deste trabalho foi desenvolver um modelo de programação linear para determinar os níveis das atividades de produção que maximizem o lucro da propriedade. O modelo representa o sistema de produção da fazenda Lagoa do Fogão, localizada no município de Guafrá, estado de São Paulo, com um total de 207 ha irrigados por três sistemas de aspersão do tipo pivô-central, focalizando a atividade agrícola no período de inverno, quando ocorre restrição de água quanto ao volume disponível.

MATERIAL E MÉTODOS

A fazenda Lagoa do Fogão encontra-se localizada no município de Guafrá, a 400 km de São Paulo, com as seguintes coordenadas geográficas: 20°27'33" de latitude sul, 48°19'30" de longitude oeste e 595 m de altitude. A propriedade dista 4,8 km do centro urbano do município, na direção noroeste, na estrada vicinal que liga Guafrá a Guaritá.

1. Recursos hídricos: A propriedade estudada possui um poço tubular profundo, explorando o aquífero Serra Geral, produzindo uma vazão de 60 m³/h, durante 30 dias por ano. É banhada pelo ribeirão Santa Quitéria, cuja vazão plurianual estimada é de 187,9 m³/h (ARCE, 1990) da qual 36,3 m³/h (vazão mínima anual de sete dias consecutivos e período de retorno de 10 anos) é garantida para irrigação. Como esta vazão contínua é insuficiente para a irrigação, foi construído um pequeno dique ao lado do ribeirão para acumular um certo volume de água e facilitar a captação, através da derivação da vazão permitida. Entretanto, esse volume ainda é pequeno para satisfazer a necessidade de irrigação das culturas.

Existe ainda na propriedade três reservatórios de água, que acumulam um volume útil total de 165000 m³. O reservatório 1 acumula 83000 m³ e os reservatórios 2 e 3 acumulam, cada um, 41000 m³. A água armazenada nesses reservatórios e utilizada para irrigação de grande parte da área, é proveniente das chuvas e do escoamento superficial resultante.

Freqüentemente, as chuvas e o volume de água armazenado não têm sido suficientes para suprir as necessidades de água das culturas conduzidas no inverno, sob os três pivôs-centrais existentes na propriedade.

2. O sistema de irrigação: Existe na propriedade 207 ha irrigados por três sistemas tipo pivô-central: pivô 1 - vazão de 267 m³/h e área de 94 ha; pivô 2 - vazão de 186 m³/h e área de 66 ha; pivô 3 - vazão de 155 m³/h e área de 47 ha.

A forma atual de operação dos sistemas de irrigação é a seguinte: (a) o pivô 1 é abastecido pela água acumulada, proveniente do ribeirão Santa Quitéria; quando esse volume de água não satisfaz a demanda, é feita a suplementação com a água do reservatório 1, transferida para o local de captação através de uma tubulação enterrada; (b) os pivôs 2 e 3 são abastecidos pelos reservatórios 2 e 3; a água do reservatório 2 e do poço profundo é bombeada para o reservatório 3, onde é feita a captação.

3. Padrão de culturas: Neste trabalho é considerado o cultivo de inverno, época na qual se utiliza intensamente a irrigação. Um padrão de culturas aproximado, utilizado na propriedade, é apresentado na TABELA 1.

4. Necessidade de irrigação: O cálculo da lâmina bruta de irrigação em cada pentada foi feito com base na equação:

$$h = \frac{K_c \cdot ET_o - P_{50\%}}{E_a}$$

sendo,

h - lâmina bruta de irrigação, em mm;

ET_o - evapotranspiração de referência, em mm;

$P_{50\%}$ - precipitação mínima esperada em nível de probabilidade de 50 %;

K_c - coeficiente de cultura;

E_a - eficiência de aplicação de água, em decimal.

A evapotranspiração de referência e a precipitação acumulada por pentada (estimada a 50% de probabilidade) foram obtidas no trabalho de ARCE (1990). A evapotranspiração foi calculada com base na equação de Penman e a precipitação provável pela distribuição gama. A precipitação média em cada pentada ocorre em níveis de probabilidades inferiores a 30%.

Os coeficientes de cultura, para cada estágio de desenvolvimento das culturas estudadas, foram adaptados de DOORENBOS & KASSAM (1979). O valor da eficiência de aplicação de água dos sistemas de irrigação da fazenda Lagoa do Fogão foi considerado como sendo 80%, conforme relatado no trabalho de ARCE (1990).

5. Coeficientes técnicos das culturas: Os valores dos coeficientes técnicos das culturas (TABELA 2), foram obtidos do trabalho de ARCE (1990), atualizados e convertidos em dólar comercial em setembro de 1993.

6. O modelo de programação linear: Em termos gerais, a formulação do modelo básico de programação linear, quando se deseja otimizar uma função objetivo, consiste em determinar os valores que devem adquirir as variáveis X_1, X_2, \dots, X_n , não negativas, e que satisfaçam às condições de linearidade, que podem tomar a forma de desigualdade (SINGH *et al.*, 1987; HILLIER & LIEBERMAN, 1988). Para este trabalho, foram definidos:

X_{ij} - área cultivada com a cultura i , sob o pivô-central j , em ha, sendo $i = 1, 2, \dots, 5$ e $j = 1, 2, 3$;

Y_i - produtividade da cultura i , em kg/ha;

P_i - preço por unidade de produção da cultura i , em US\$/kg;

C_i - custo de produção da cultura i , em US\$/ha;

Z - receita líquida, em US\$.

TABELA 1. Padrão de culturas da fazenda Lagoa do Fogão.

Cultura	Semeadura		Colheita		Ciclo (dias)
	Data	Pentada	Data	Pentada	
Tomate	20/03	16	20/08	46	153
Trigo	20/04	22	20/08	46	122
Batata	05/05	25	25/08	47	110
Ervilha	15/05	27	05/08	43	82
Feijão	15/06	33	05/10	55	113

Para ambos os pivôs foi definida a seguinte função objetivo:

$$\text{Max } Z = \sum_{j=1}^3 \sum_{i=1}^5 P_i Y_i X_{ij} - \sum_{j=1}^3 \sum_{i=1}^5 C_i X_{ij}$$

seguinte-se o conjunto de restrições:

a) Máxima área disponível sob cada pivô-central:

$$\sum_{i=1}^5 X_{ij} \leq b_j, \text{ para } j = 1, 2, 3.$$

sendo b_j o parâmetro do modelo que representa a quantidade máxima de terra disponível às cinco atividades, sob cada pivô-central, em ha, conforme relatado no item 2.2.

b) Máxima área a ser cultivada com a cultura i

$$\sum_{j=1}^3 X_{ij} \leq S_i, \text{ para } i = 1, 2, \dots, 5.$$

sendo S_i a restrição de área da cultura i , em ha. Neste caso, admitiu-se uma área máxima de 33 ha para cultivo de tomate, devido a contrato firmado entre o produtor e a indústria.

c) Balanço entre consumo e disponibilidade de água para o pivô 1

$$\sum_{i=1}^5 h_{ik} X_{ik} - T_{jk} \leq V_k, \text{ para } j=1 \text{ e } k=16, \dots, 55$$

sendo h_{ik} - lâmina bruta de irrigação, requerida pela cultura i na pentada k , em dm;

T_{jk} - volume de água transferida do reservatório 1 para o local de captação do pivô 1, na pentada k , em dm.ha;

V_k - volume de água garantido pelo ribeirão na pentada k , (4,3 dm.ha).

(d) Quanto ao total de água transferida do reservatório 1 para o local de captação do pivô 1:

$$\sum_{k=16}^{55} T_{jk} \leq Q_1, \text{ para } j=1$$

sendo Q_1 o volume de água disponível no reservatório 1 para irrigação da área sob o pivô 1 (83 dm.ha).

e) Balanço entre consumo e transferência de água do reservatório 3 para as áreas sob os pivôs 2 e 3:

O volume de água utilizado para irrigação das culturas sob os pivôs-centrais 2 e 3, na pentada k , deve ser no máximo igual ao volume de água transferido do reservatório 3 para as áreas correspondentes.

$$\sum_{j=2}^3 \sum_{i=1}^5 h_{ik} X_{ij} - \sum_{j=2}^3 T_{jk} \leq 0, \text{ para } k=16, \dots, 55$$

(f) Quanto a transferência total de água do reservatório 3 para as áreas sob os pivôs 2 e 3:

Os pivôs-centrais 2 e 3 são abastecidos pelos reservatórios 2 e 3 e pelo poço profundo, sendo a água captada no reservatório 3. Nesse caso, o volume total de água disponível para irrigação e possível de ser transferido é de 125 dm.ha.

$$\sum_{k=16}^{55} \sum_{j=2}^3 T_{jk} \leq Q_{23}$$

sendo, Q_{23} o volume total de água disponível para irrigação das áreas sob os pivôs 2 e 3, em dm.ha.

Para solucionar o problema de programação linear formulado, na forma de uma matriz de 95 variáveis e 86 restrições, utilizou-se o software desenvolvido pela Eastern Software Product, Inc., de nome Linear Programming-88 (LP-88).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

1. Padrão de cultivos: Na TABELA 3 é apresentada a combinação ótima de culturas, de acordo com as restrições de terra, água e mercado. Observa-se que na área sob o pivô-central 1 estimou-se que devem ser cultivados 33 ha de tomate e 61 ha de feijão, isto é, uma ocupação de 100% da área. Sob o pivô-central 2, dos 66 ha disponíveis, devem ser cultivados 64 ha de feijão (97% da área), sendo nesse caso a água uma restrição efetiva. Sob o pivô-central 3 não se deve cultivar, pois não há água disponível. Esse padrão de cultivo corresponde à solução ótima para o modelo de programação linear formulado de curto prazo produzindo, aos preços estipulados, um lucro de US\$ 349.636,80. Observa-se, ainda, que trigo, batata e ervilha sob o pivô-central 1, têm receitas marginais de US\$ 956,80, US\$ 560,00 e US\$ 489,60 respectivamente, mas seus custos marginais são de US\$ 1.815,20, isto é, cultivar essas culturas acarretará uma redução no lucro da ordem de US\$ 858,40, US\$ 1.255,20 e US\$ 1.325,60 por unidade de área cultivada, respectivamente, sob o pivô-central 1.

TABELA 2. Coeficientes técnicos das culturas.

i	Cultura	Produtividade (kg/ha)	Receita bruta (US\$/ha)	Custos de produção (US\$/ha)	Receita líquida (US\$/ha)
1	Tomate	58.620,0	6.069,6	2.421,6	3.648,0
2	Trigo	3.597,0	1.438,6	481,5	957,1
3	Batata	36.000,0	1.371,6	811,6	560,0
4	Ervilha	2.035,0	1.301,7	812,1	489,6
5	Feijão	2.157,0	2.416,0	601,0	1.815,0

TABELA 3. Distribuição das culturas por área.

Variável	Estado	Valor da variável	Receita marginal (US\$/ha)	Custos marginal (US\$/ha)	Preço sombra (US\$)
Tomate1	básica	33,0	3.648,00	3.648,00	0,00
Trigo1	não-básica	0,0	956,80	1.815,20	858,40
Batata1	não-básica	0,0	560,00	1.815,20	1.255,20
Ervilha1	não-básica	0,0	489,60	1.815,20	1.325,60
Feijão1	básica	61,0	1.815,20	1.815,20	0,00
Tomate2	básica	0,0	3.648,00	3.648,00	0,00
Trigo2	não-básica	0,0	956,80	1.409,60	452,80
Batata2	não-básica	0,0	560,80	1.540,80	980,80
Ervilha2	não-básica	0,0	489,60	1.096,80	607,20
Feijão2	básica	64,0	1.815,20	1.815,20	0,00
Tomate3	não-básica	0,0	3.648,00	3.648,00	0,00
Trigo3	não-básica	0,0	956,80	1.409,60	452,80
Batata3	não-básica	0,0	560,00	1.540,80	980,80
Ervilha3	não-básica	0,0	489,60	1.096,80	607,20
Feijão3	não-básica	0,0	1.815,20	1.815,20	0,00

Na área sob o pivô 2, observa-se que ao se cultivar 1 ha de trigo, batata e ervilha espera-se reduções do lucro da ordem de US\$ 452,80, US\$ 980,80 e US\$ 607,20, respectivamente. Em relação ao tomate, que pertence à solução ótima para a

área sob o pivô-central 2, verifica-se que seu valor na solução é zero; isso porque os 33 ha permitidos para cultivo, de acordo com a restrição imposta para mercado, foram cultivados sob o pivô-central 1. Se a restrição de mercado for relaxada, certamente

será cultivada uma determinada área de tomate sob o pivô-central 2. Para o pivô-central 3, o modelo previu que não há água disponível para irrigação.

2. Análise de sensibilidade da função objetivo:

Uma vez que a solução encontrada pelo modelo de programação linear é ótima, a análise de sensibilidade é muito útil para observar o comportamento das variáveis que pertencem a solução. Para o caso em estudo, observa-se na TABELA 4 que se a cultura do tomate na área sob o pivô-central 1 apresentar valor de receita marginal entre US\$ 3.538,40 e US\$ 3.676,00, a solução ainda será ótima. Isso significa que o tomate, embora seja de cultivo obrigatório, sua receita deve estar entre estes limites para manter a solução ótima. Para o feijão, observa-se que se a variação da receita marginal estiver entre US\$ 1.787,20 e US\$ 1.925,60, a solução permanecerá ótima.

No caso das culturas que não participam da solução ótima, observa-se na TABELA 4 que não aparece o valor mínimo, somente o valor máximo, superior à sua receita marginal, exceto para o tomate e o feijão sob o pivô 3, significando que a alternativa mais viável caso se tenha disponibilidade de água, seria cultivar feijão e tomate nessa área. Outras alternativas de culturas que se tente implementar, mantendo os valores atuais de receita marginal, acarretarão decréscimos no lucro.

3. Análise de sensibilidade do recurso água: Na TABELA 5, para o pivô-central 1, observa-se que os volumes máximo e mínimo do recurso água correspondem aos requerimentos de irrigação para o padrão de cultura ótimo. O recurso água por pentada neste pivô não foi totalmente utilizado, existindo folga de água para esta área e, conseqüentemente, preço sombra igual a zero. Em relação a água total, observa-se que o mínimo a utilizar é 73 dm.ha, sem apresentar valor máximo e preço sombra. Isso é devido ao fato que, dos 83 dm.ha disponíveis, somente são utilizados 73 dm.ha, tendo folga de 10 dm.ha.

Observa-se que, para o pivô-central 2 (TABELA 5), ocorrem valores mínimos do recurso água iguais ao requerimento de irrigação, necessários para irrigar 64 ha de feijão. Estes correspondem aos valores mínimos de água que se podem aplicar, já que para valores maiores de utilização de água por pentada, terá que pagar até US\$ 921,42 por dm.ha. Nesse caso não ocorrem

valores máximos. Em relação à água total, é apresentado um valor mínimo para o uso de água igual à disponibilidade, podendo-se pagar até US\$ 921.42 por 1000 m³.

CONSIDERAÇÕES GERAIS

1. Limitações do modelo: O modelo é composto de relações lineares e adota de forma determinista coeficientes de comportamento aleatório (preços do produto, quantidade de água necessária à irrigação e disponibilidade de água).

A adoção de estimativas numéricas dos parâmetros em lugar de elementos probabilísticos, pode conduzir à seleção de decisões não satisfatórias. Outra limitação do modelo é considerar um nível fixo de produção em função de uma lâmina média de irrigação. Na prática, as relações entre água e produção são funções não lineares, mostrando retorno decrescente ao fator variável.

2. Alternativas de manejo da irrigação: Quando o suprimento de água disponível é limitado, a produção da cultura fica determinada pelo grau com que se pode atender as necessidades hídricas totais mediante o suprimento de água disponível durante o ciclo da cultura. A seleção de culturas e área irrigada deve basear-se nos rendimentos das culturas sob regime de irrigação com déficit, durante o período de desenvolvimento e em fases específicas.

Quando as culturas são muito sensíveis ao déficit hídrico, a irrigação deve atender todas as suas necessidades hídricas. Quando são menos sensíveis, o calendário deve ser adotado de forma a minimizar os déficits hídricos apenas durante as fases mais sensíveis.

3. Novas propostas de modelo: Quando os parâmetros do modelo caracterizam-se por uma distribuição de probabilidades que apresenta uma grande dispersão em torno da estimativa adotada num modelo determinista, justifica-se o emprego de modelos mais elaborados, considerando os fatores de risco. As principais abordagens propostas são divididas em dois grupos, de acordo com o tratamento que se dá à fonte de incerteza. No primeiro grupo, a única fonte de incerteza está relacionada ao coeficiente de cada alternativa de produção na função objetivo. No segundo grupo, estão as abordagens que incluem nos modelos a aleatoriedade dos coeficientes técnicos das restrições e níveis dos recursos disponíveis na propriedade.

TABELA 4. Análise de sensibilidade da função objetivo.

Cultura	Pivô-central	Estado	Valor da variável (ha)	Retorno unitário (US\$/ha)	Retorno Mínimo (US\$/ha)	Retorno Máximo (US\$/ha)
Tomate	1	básica	33,0	3.684,00	3.538,40	3.676,00
Trigo	1	não-básica	0,0	956,80	nenhum	1.815,20
Batata	1	não-básica	0,0	560,00	nenhum	1.815,20
Ervilha	1	não-básica	0,0	489,60	nenhum	1.815,20
Feijão	1	básica	61,0	1.815,20	1.786,20	1.925,60
Tomate	2	básica	0,0	3.648,00	3.648,00	3.759,20
Trigo	2	não-básica	0,0	956,80	nenhum	1.409,60
Batata	2	não-básica	0,0	560,00	nenhum	1.540,80
Ervilha	2	não-básica	0,0	489,60	nenhum	1.096,80
Feijão	2	básica	64,0	1.815,20	1.815,20	1.843,20
Tomate	3	não-básica	0,0	3.648,00	nenhum	3.648,00
Trigo	3	não-básica	0,0	935,20	nenhum	1.409,60
Batata	3	não-básica	0,0	560,00	nenhum	1.580,80
Ervilha	3	não-básica	0,0	489,60	nenhum	1.096,80
Feijão	3	não-básica	0,0	1.815,20	nenhum	1.815,20

A resposta das culturas à água constitui funções não lineares, denominadas funções de produção. Tais funções podem ser tratadas por aproximações lineares e a otimização pode ser feita utilizando a técnica de programação linear separável. Isso permite a definição de lâminas ótimas de irrigação ao longo do ciclo da cultura.

CONCLUSÕES

a) Na área sob o pivô-central 1, foram alocados 33 ha de tomate e 61 ha de feijão e na área sob o pivô-central 2, 64 ha de feijão. Sob o pivô-central 3 não é possível desenvolver agricultura irrigada, por falta de água disponível.

b) Para irrigação da área sob o pivô-central 1, foram consumidos 73 dm.ha de água (73000 m³), havendo uma folga em relação à disponibilidade to-

tal, igual a 10 dm.ha (10000 m³). Na área sob o pivô-central 2, foram consumidos 125 dm.ha (125000 m³), correspondendo ao volume total disponível.

c) A combinação ótima de atividades nas áreas irrigadas, para o volume de água disponível, sempre foi feijão e tomate, devido aos seus valores de receita marginal. Na área sob o pivô 1, no caso do feijão, a receita marginal poderá variar entre os limites de US\$ 1.787,20 e US\$ 1.925,60, sem alterar a solução ótima. Para a cultura do tomate, a receita marginal poderá variar entre os limites de US\$ 3.538,40 e US\$ 3.660,00. Na área sob o pivô 2, o valor mínimo da receita marginal para o feijão foi de US\$ 1.815,20. Nessa área, só deverá cultivar tomate se for liberada a restrição de mercado, o que nesse caso, depende do contrato firmado entre o proprietário e a indústria.

TABELA 5. Análise de sensibilidade do recurso água (preço-sombra expresso em US\$/dm.ha)

Pentada	Pivô-central 1		Pivô-central 2	
	Volume Mínimo (dm.ha)	Volume Máximo (dm.ha)	Preço sombra	Volume Mínimo (dm.ha)
16	0,00	0,00	0,00	0,00
17	0,00	0,00	0,00	0,00
18	0,00	0,00	0,00	0,00
19	1,65	nenhum	0,00	0,00
20	1,32	nenhum	0,00	0,00
21	0,00	4,62	0,00	0,00
22	4,29	nenhum	0,00	0,00
23	3,96	nenhum	0,00	0,00
24	3,96	nenhum	0,00	0,00
25	0,00	5,28	0,00	0,00
26	0,00	4,95	0,00	0,00
27	0,00	4,62	0,00	0,00
28	4,29	nenhum	0,00	0,00
29	4,29	nenhum	0,00	0,00
30	3,96	nenhum	0,00	0,00
31	3,63	nenhum	0,00	0,00
32	3,63	nenhum	0,00	0,00
33	0,00	4,47	921,40	1,92
34	0,00	4,47	921,40	1,92
35	0,00	6,91	921,40	4,48
36	0,00	6,91	921,40	4,48
37	0,00	6,91	921,40	4,48
38	0,00	7,24	921,40	4,48
39	0,00	10,29	921,40	7,68
40	0,00	10,29	921,40	7,68
41	0,00	10,24	921,40	8,32
42	0,00	10,57	921,40	8,32
43	0,00	11,18	921,40	8,96
44	0,00	12,12	921,40	8,60
45	0,00	9,07	921,40	6,40
46	0,00	9,40	921,40	6,40
47	0,00	6,71	921,40	7,04
48	0,00	6,71	921,40	7,04
49	0,00	7,32	921,40	7,68
50	0,00	7,32	921,40	7,68
51	3,05	nenhum	921,40	3,20
52	3,05	nenhum	921,40	3,20
53	3,05	nenhum	921,40	3,20
54	1,83	nenhum	921,40	1,92
55	0,00	0,00	921,40	0,00
Total	73,00	nenhum	921,40	125,00

d) A área cultivada sob regime de irrigação no pivô 1 é de 94 ha, podendo variar de 88 a 100 ha sem alterar a solução ótima. Para aumentar a área irrigada além dos 94 ha até o limite de 100 ha, pode-se pagar um máximo de US\$ 1,815.20 por hectare incorporado à área irrigada.

e) Na área sob o pivô-central 2, permitiu-se cultivar 64 ha de feijão, consumindo-se toda a água disponível, isto é, 125 dm.ha. Para valores maiores de utilização de água, pode-se pagar no máximo US\$ 921,42 por dm.ha (1000 m³) utilizado a mais. Para o pivô-central 1, houve folga de água e a área disponível de 94 ha foi toda ocupada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARCE, R.A.B. Otimização de um projeto hidroagrícola, no município de Guaíra (SP), utilizando programação linear. Piracicaba, 1990. 76p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.
- BENEDINI, M. Developments and possibilities of optimization models. *Agricultural Water Management*, Amsterdam, v.13, n.2/4, p.329-358, 1988.
- BERNARDO, D.J.; WHITTLESEY, N.K.; SAXTON, K.E.; BASSETT, D.L. Irrigation optimization under limited water supply. *Transactions of the ASAE*, St. Joseph, v.31, n.3, p.712-719, 1988.
- BOSCH, D.J.; EIDMAN, V.R.; OOSTHUIZEN, K. A review of methods for evaluating the economic efficiency of irrigation. *Agricultural Water Management*, Amsterdam, v.12, n.3, p.231-245, 1986.
- BULLER, O; MANGES, H.L.; STONE, L.R.; WILLIAMS, J.R. Modeled crop water use and soil water drainage. *Agricultural Water Management*, Amsterdam, v.19, n.2, p.117-134, 1991.
- DOORENBOS, J.A.; KASSAM, H. Efectos del agua sobre el rendimiento de los cultivos. Roma: FAO, 1979. 212p. (Estudios FAO Riego y Drenaje, 23).
- HILLIER, F.S.; LIEBERMAN, G.J. *Introdução à pesquisa operacional*. São Paulo: EDUSP, 1988. 850p.
- HUANG, W.Y.; LIANG, T.; WU, I-pai. Optimizing water utilization through multiple crops scheduling. *Transactions of the ASAE*, St. Joseph, v.18, n.2, p.293-298, 1975.
- LEBDI, F.; ENNABLI, N.; TARHOUNI, J. Application de la programmation lineare a la planification de l'irrigation en condition de penurie. In: *INTERNATIONAL CONGRESS ON IRRIGATION AND DRAINAGE*, 14., 1990, Rio de Janeiro. *Transactions Actes...* Rio de Janeiro: International Commission on Irrigation and Drainage, 1990. p.345-353.
- NEVES, E.M.; GRAÇA, R.L.; McCARL, B. Programação matemática aplicada a dados experimentais no Brasil: problemas atuais, limitações e sugestões. In: CONTINI, E. ARAÚJO, J.D. de ; GARRIDO, W.E., (ed.) *Planejamento da propriedade agrícola: modelos de decisão*. Brasília: EMBRAPA, 1984. p.101-109.
- PALACIOS VELEZ, E. *Introducion a la teoria de la operacion de distritos y sistemas de riego*. Chapingo: Escuela Nacional de Agricultura, 1977. 472p.
- RAO, N.H.; SARMA, P.B.S.; CHANDER, S. Irrigation scheduling under a limited water supply. *Agricultural Water Management*, Amsterdam, v.15, n.2, p.165-175, 1988.
- SINGH, R.; SONI, B.; CHANGKAKOTI, A.K. Optimal utilization of irrigation water in Garufella Catchment in Assam, India. In: ANSTEY, T.R.; SHAMIR, U., (Ed). *Irrigation and water allocation*. Vancouver: Irrigation Walling-Ford, 1987. p.195-205. (IAHS. Publications, 169)

Recebido para publicação em 13.12.93

Aceito para publicação em 10.12.94