

OTIMIZAÇÃO DO USO DA ÁGUA NO PERÍMETRO IRRIGADO FORMOSO APLICANDO LÂMINAS MÁXIMAS DE ÁGUA

JORGE LUIS COPQUER DOS SANTOS JÚNIOR¹; JOSE ANTONIO
FRIZZONE² E VITAL PEDRO DA SILVA PAZ³

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Baiano - Campus Valença, jorge.copquer@valenca.ifbaiano.edu.br

²Departamento de Engenharia de Biosistemas, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” –Piracicaba-SP. frizzone@usp.br

³Núcleo de Engenharia de Água e Solo, Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Alma - BA. vpspaz@gmail.com

1 RESUMO

A otimização do uso da água é um desafio para os gerenciadores, pois o planejamento da irrigação requer cuidados especiais a fim de compatibilizar o balanço hídrico com a demanda, tanto no que se refere à quantidade como a sua repartição espacial e temporal. O objetivo do presente trabalho consistiu em propor um plano ótimo de cultivo, utilizando um modelo de programação linear, com lâminas máximas de água, que proporcione a maximização da renda do agricultor e a otimização do uso dos recursos hídricos no Perímetro de Irrigação Formoso. A maximização da receita líquida no Perímetro Irrigado Formoso foi de R\$ 67.643.676,78, utilizando o seguinte padrão de cultivo: 30 ha de abóbora, 30 ha de feijão Phaseolus, 1.243 ha de melancia, 1.542 ha de banana, 1.200 ha de mamão e 300 ha de limão Tahiti, para o volume anual de 79.649.300 m³.

Palavras-Chave: Gerenciamento de recursos hídricos, Eficiência econômica, Irrigação

SANTOS JÚNIOR, J. L. C., FRIZZONE, J. A., PAZ, V. P. da S.
OPTIMIZATION OF WATER USE IN FORMOSO IRRIGATED DISTRICT
USING MAXIMUM DEPTHS OF WATER

2 ABSTRACT

The optimization of water use has been a challenge for managers, as irrigation planning requires special care, in order to reconcile water balance and demand in terms of quantity as well as spatial and temporal distribution. The objective of this study was to set an optimum crop plan using a linear programming model, with maximum depths of water, to maximize the farmer's income and optimize the use of water resources in Formoso Irrigated District. Maximization of the net revenue in Formoso Irrigated District was R\$ 67.643.676,78. The following crop-growing pattern was used: 30 ha squash, 30 ha Phaseolus beans, 1243 ha watermelon, 1542 ha banana, 1200 ha papaya and 300 ha Tahiti lime for the annual volume of 79,649,300 m³.

Keywords: water resource management, economic efficiency, irrigation

3 INTRODUÇÃO

A otimização da rentabilidade constitui o principal objetivo da empresa agrícola e está associada ao uso racional dos recursos disponíveis no processo de produção de forma a se obterem os mais altos níveis de rendimento econômico. A água e os nutrientes são fatores preponderantes para o êxito da agricultura e seu manejo racional é imperativo na otimização da produção agrícola (DELGADO, et al., 2010). Além disso, as maiores variações no rendimento das culturas é a resposta às mudanças nos níveis desses dois recursos, expressando a alta sensibilidade do rendimento aos níveis desses fatores de produção (FRIZZONE, 2009).

A escassez de água requer uma análise de custo de oportunidade e o tomador de decisão deve considerar todas as áreas e culturas e todo o uso alternativo da água simultaneamente, alocando uma quantidade maior de água para culturas mais rentáveis, ou até disponibilizando água para usos externos à propriedade. Análises podem ser realizadas utilizando técnicas de programação matemática para a otimização das atividades, possibilitando quantificar, de forma otimizada, o uso dos recursos para satisfazer determinado objetivo, seja a maximização da receita líquida ou a minimização dos custos, sob restrições na disponibilidade dos recursos (DANTAS NETO; AZEVEDO; FRIZZONE, 1997; RODRIGUES et al., 2000; GORANTIWAR; SMOUT, 2003; SANTOS et al., 2005).

Um manejo eficiente da irrigação requer informações relacionadas às necessidades de água das culturas e da função de produção das culturas à água. O uso das funções de resposta permite encontrar soluções úteis na otimização do uso da água e dos fertilizantes, obtendo-se o máximo do produto com determinado custo de produção (SOARES et al., 2002; CASTRO et al. 2007).

O objetivo do presente trabalho consistiu no uso de um modelo de programação linear, com lâminas máximas de água, para propor um plano ótimo de cultivo que proporcione a maximização do retorno líquido do Perímetro de Irrigação Formoso, especificamente quanto à área de lotes familiares.

4 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo desenvolvido refere-se ao planejamento da irrigação no Perímetro Irrigado Formoso no município de Bom Jesus da Lapa - Bahia, localizado nas coordenadas de 13 °15 ' de latitude sul e 43 ° 32 ' de longitude oeste e altitude média de 439 m. O maior volume anual de água ofertado aos usuários foi 79.649.300 m³ e o volume mensal foi 10.833.500 m³, no ano de 2009. O modelo geral é uma adaptação proposta por Frizzone (2009) cujo objetivo é determinar um padrão ótimo de cultivo, de forma a maximizar o lucro do projeto, decorrente de várias culturas (Tabela 1).

Tabela 1. Requerimentos mensais de água (mm) das culturas estudadas (RMAi)

Mês	Culturas							
	Abóbora (X10) (X20)	Feijão <i>Phaseolus</i> (X30) (X40)	Feijão <i>Vigna</i> (X50) (X60)	Melancia (X70) (X80)	Milho (X90)	Banana (X100)	Mamão (X110)	Limão (X112)
Jan	*-	-	-	-	241,8	268,4	129,6	222,4
Fev	131,5	-	-	-	170,6	231,4	111,7	201,3
Mar	133,3	143,7	-	-	-	234,5	113,2	165,1
Abr	119,2	214,2	126,9	238,1	-	209,8	101,3	139,1
Mai	-	187,1	184,8	355,6	-	203,6	98,3	160,3
Jun	115,6	116,9	188,2	293,3	-	186,6	90,1	108,3
Jul	123,2	207,8	98,9	188,2	-	199,0	96,1	98,9
Ago	145,2	220,3	174,8	341,2	-	234,5	113,2	97,1
Set	-	-	226,2	357,6	-	273,0	131,8	124,4
Out	-	-	-	-	-	319,3	154,1	304,3
Nov	-	-	-	-	147,8	277,7	134,0	207,1
Dez	-	-	-	-	214,8	262,2	126,6	271,6

* - período não cultivado com a cultura.

Para determinação dos requerimentos mensais de água das culturas perenes considerou-se a necessidade mensal durante o período de franca produção, no cálculo da evapotranspiração máxima (ETm) das culturas anuais utilizaram-se os coeficientes de cultivo, Kc, referente a cada estágio vegetativo, enquanto que para culturas permanentes, utilizou-se o valor de Kc para a cultura em pleno desenvolvimento. A ETm foi calculada pelo produto entre a evapotranspiração de referência e o coeficiente de cultivo. As lâminas máximas e mínimas de água, bem como suas respectivas produtividades, são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Lâminas de água mínima e máxima para cada cultura estudada e respectivas produtividades.

Culturas	Valor Mínimo de	Valor Mínimo de	Valor Máximo de	Valor Máximo de
	W (mm)	Y (kg ha ⁻¹)	W (mm)	Y (kg ha ⁻¹)
Abóbora	210	17.317	384	22.133
Feijão <i>Phaseolus</i>	380	1.028	545	2.669
Feijão <i>Vigna</i>	330	1.178	500	1.539
Melancia	350	20.482	887	33.670
Milho	350	5.828	775	7.555
Banana	1.520	18.812	2.900	37.856
Mamão	800	33.405	1.400	94.784
Limão tahiti	1.400	10.060	2.100	31.060

Y: Produtividade (kg/ha); W: Lâmina de água (mm)

A função objetivo

O modelo utilizado neste estudo foi baseado nos dados que compõem os Relatórios de Monitoria Ano Agrícola de 2010 e 2011 da 2ª Superintendência

Regional da CODEVASF, no Plano de assistência técnica e extensão rural do Perímetro de Irrigação Formoso para 2010 e nas informações adicionais fornecidas pelo referido órgão. Os coeficientes da função-objetivo representam a renda líquida por unidade de área para cada uma das culturas (R\$.ha⁻¹). Para obtenção dos coeficientes baseou-se nos preços dos produtos, níveis de produtividade e custos de produção ao longo do período considerado na análise. Assim, procurou-se formular o modelo com as características de exploração da área, que permitisse determinar os melhores planos, adequando-os às finalidades do estudo, mediante uma esquematização matricial própria do instrumento utilizado.

O modelo função objetivo para a área irrigada foi especificada como a maximização dos retornos líquidos anuais, RL, sujeitos às restrições de disponibilidade de água e outros insumos. Esquemáticamente, pode ser representado da seguinte forma:

$$\text{MAX RL} = \sum_{i=1}^n P_i X_i Y_i - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m A_{ij} X_i C_j \quad (1)$$

Tendo como restrições:

$$\sum_{i=1}^n W_i X_i \leq WM_g \quad (i = 1.., n; g = 1..,12) \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^n W_i X_i \leq WT \quad (i = 1.., n) \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m A_{ij} X_i \leq S_j \quad (i = 1.., n; j = 1.., m) \quad (4)$$

$$X_i \geq 0 \quad (5)$$

onde:

g – número inteiro representando o mês do ano ($g=1, 2, \dots, 12$); i – número inteiro representando a cultura ($i=1, 2, \dots, n$); j – número inteiro representando outros insumos ($j=1, 2, \dots, m$); P_i – preço unitário do produto da i -ésima cultura; X_i – área cultivada com a i -ésima cultura; $Y_i = f(w_i)$, produtividade obtida da cultura i , quando aplicado w_i unidades de água; A_{ij} – quantidade demandada do insumo j pela cultura i ; C_j – custo unitário do insumo j usado pela cultura i ; W_i – quantidade de água por unidade de área para irrigar a i -ésima cultura de produtividade y_i ; WT – quantidade total de água disponível; S_j – disponibilidade máxima do insumo j ; WM – quantidade mensal de água disponível.

O modelo aplicado

A função objetivo para o problema foi:

$$\text{MAX RL} = 2902,18X_{10} + 2902,18X_{20} + 2480,08X_{30} + 2480,08X_{40} + 718,29X_{50} + 718,29X_{60} + 4511,10X_{70} + 4511,10X_{80} + 987,14X_{90} + 9011,72X_{100} + 36266,39X_{110} + 13988,03X_{120} \quad (6)$$

onde:

MAX RL – maximização de RL (LUCRO);

X₁₀ - área plantada com abóbora em fevereiro (ha);

X₂₀ – área plantada com abóbora em junho (ha);

X₃₀ – área plantada com feijão *Phaseolus* em março (ha);

- X40 – área plantada com feijão *Phaseolus* em junho (ha);
 X50 – área plantada com feijão *Vigna* em abril (ha);
 X60 – área plantada com feijão *Vigna* em julho (ha);
 X70 – área área plantada com melancia em abril (ha);
 X80 – área plantada com melancia em julho (ha);
 X90 – área plantada com milho em novembro (ha);
 X100 – área plantada com banana no 3º ano da cultura (ha);
 X110 – área plantada com mamão no 1º ano da cultura (ha);
 X120 – área plantada com limão Tahiti no 5º ano da cultura (ha).

As restrições de área correspondem à combinação das culturas nos 12 meses do ano e determinam que a ocupação da área deve ser menor ou igual a área disponível. Considerou-se no estudo uma área disponível de 4.405 ha, que representa a área dos lotes familiares no Perímetro de Irrigação Formoso. As equações referentes às restrições de área (R.1) estão enumeradas de (07) a (18).

O modelo está sujeito às restrições de:

1. Restrição de Área:

$$A1 - X90 + X100 + X110 + X120 \leq 4405 \quad (7)$$

$$A2 - X10 + X90 + X100 + X110 + X120 \leq 4405 \quad (8)$$

$$A3 - X10 + X30 + X100 + X110 + X120 \leq 4405 \quad (9)$$

$$A4 - X10 + X30 + X50 + X70 + X100 + X110 + X120 \leq 4405 \quad (10)$$

$$A5 - X30 + X50 + X70 + X100 + X110 + X120 \leq 4405 \quad (11)$$

$$A6 - X40 + X50 + X70 + X100 + X110 + X120 \leq 4405 \quad (12)$$

$$A7 - X20 + X40 + X60 + X80 + X100 + X110 + X120 \leq 4405 \quad (13)$$

$$A8 - X20 + X40 + X60 + X80 + X100 + X110 + X120 \leq 4405 \quad (14)$$

$$A9 - X20 + X60 + X80 + X100 + X110 + X120 \leq 4405 \quad (15)$$

$$A10 - X100 + X110 + X120 \leq 4405 \quad (16)$$

$$A11 - X90 + X100 + X110 + X120 \leq 4405 \quad (17)$$

$$A12 - X90 + X100 + X110 + X120 \leq 4405 \quad (18)$$

onde:

A1 – área irrigada no mês de janeiro

A2 – área irrigada no mês de fevereiro

.

.

.

A11 – área irrigada no mês de novembro

A12 – área irrigada no mês de dezembro

As restrições de água garantem que a demanda mensal de água das culturas não seja maior que o volume de água disponível pelo distrito durante cada mês. O volume mensal utilizado para cálculo do volume disponível no mês mais crítico (outubro) foi de 10.833.500 m³, e o maior volume anual de água ofertado aos usuários foi 79.649.300 m³ no ano de 2009. As equações referentes às restrições de água (R.2) estão enumeradas de (19) a (25).

2. Restrição de Água:

$$W1 - 2,418X90 + 2,684X100 + 1,296X110 + 2,224X120 \leq 10.833,500 \text{ dm.ha} \quad (19)$$

$$W2 - 1,315X1 + 1,706X9 + 2,314X10 + 1,117X11 + 2,013X12 \leq 10.833,500 \text{ dm.ha} \quad (20)$$

$$W3 - 1,333X1 + 1,437X3 + 2,345X10 + 1,132X11 + 1,651X12 \leq 10.833,500 \text{ dm.ha} \quad (21)$$

.
.
.

$$W10 - 3,193X100 + 1,541X110 + 3,043X120 \leq 10.833,500 \text{ dm.ha} \quad (22)$$

$$W10 - 1,478X90 + 2,777X100 + 1,340X110 + 2,071X120 \leq 10.833,500 \text{ dm.ha} \quad (23)$$

$$W12 - 2,148X90 + 2,622X100 + 1,266X110 + 2,716X120 \leq 10.833,500 \text{ dm.ha} \quad (24)$$

$$WT - 3,84X10 + 3,84X20 + 5,45X30 + 5,45X40 + 5,00X50 + 5,00X60 + 8,87X70 + 8,87X80 + 7,75X90 + 29,00X100 + 14,00X110 + 21,00X120 \leq 79.649,300 \text{ dm.ha} \quad (25)$$

onde:

W1, ...,W12 – volume de água mensal, em m³, disponível nos meses de janeiro, ... , dezembro.

WT– volume de água total anual disponível no projeto, em m³.

Incorporou-se ao modelo restrições de área máxima ou mínima a ser cultivada (R.3), por condições de mercado, consumo interno, capacidade de processamento ou problemas regionais, fundamentadas em estudos de mercado. Os valores de cada restrição foram estimados em função da produção média esperada por ha, e pela área cultivada, dados fornecidos pela CODEVASF e pela PLENA Consultoria e Projetos, que é a empresa que administra o Perímetro de Irrigação Formoso.

3. Restrições de Mercado

$$\text{AREAMIN1} - X10 \geq 30 \quad (26)$$

$$\text{AREAMIN3} - X30 \geq 30 \quad (27)$$

$$\text{AREAMIN7} - X70 \geq 60 \quad (28)$$

$$\text{AREAMAX7} - X70 \leq 800 \quad (29)$$

$$\text{AREAMIN10} - X100 \geq 1500 \quad (30)$$

$$\text{AREAMIN11} - X110 \geq 60 \quad (31)$$

$$\text{AREAMAX11} - X110 \leq 1200 \quad (32)$$

$$\text{AREAMAX12} - X120 \leq 300 \quad (33)$$

Onde:

AREAMIN1 – área mínima, em ha, a ser plantada com abóbora em fevereiro;

AREAMIN3 – área mínima, a ser plantada com feijão *Phaseolus* em março;

AREAMIN7 – área mínima, a ser plantada com melancia em abril;

AREAMAX7 – área máxima, a ser plantada com melancia em abril;

AREAMIN10 – área mínima, a ser plantada com banana no 3º ano da cultura;

AREAMIN11 – área mínima, a ser plantada com mamão no 1º ano da cultura;

AREAMAX11 – área máxima, a ser plantada com mamão no 1º ano da cultura;

AREAMAX12 – área máxima, a ser plantada com com limão Tahiti no 5º ano da cultura.

Na resolução do modelo de programação linear utilizou-se o programa de computação denominado LP - 88 (LINEAR PROGRAMMING – 88), o qual resolve sistemas de equações lineares, utilizando o algoritmo iterativo “método simplex revisado”, para otimização da renda líquida e para o estudo das análises de sensibilidade.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Utilizando restrições de água e área e satisfazendo as exigências de áreas máximas e mínimas de algumas culturas, como descritas na Tabela 1, o modelo resultou no seguinte plano ótimo de cultivo apresentado na Tabela 2.

Dentre as culturas estudadas, o feijão *Vigna* e milho não foram recomendadas, ao se considerar o cultivo de duas safras de abóbora e feijão *Phaseolus* anualmente, verifica-se que os cultivos de abóbora e feijão *Phaseolus* só foram indicados para a semeadura em fevereiro e março, respectivamente, com áreas de 30 ha, definidas pela necessidade de produção para atender o consumo interno. A área cultivada com limão foi de 300 ha, limite máximo para o cultivo desta cultura que está sendo testada no Perímetro Irrigado Formoso como opção de cultivo substituindo a cultura da banana em áreas afetadas pelo Mal-do-Panamá.

Tabela 3. Solução ótima para um volume anual de água igual a 79.649.300 m³ e análise de sensibilidade da função objetivo do modelo.

Culturas	Área Ótima (ha)	Retorno unitário (R\$ ha ⁻¹)	Mínimo (R\$ ha ⁻¹)	Máximo (R\$ ha ⁻¹)
Abóbora 1	30	2.902,00	Nenhum	3.386,31
Abóbora 2	-	2.902,00	Nenhum	3.386,31
Feijão <i>Phaseolus</i> 1	30	2.480,00	Nenhum	3.746,30
Feijão <i>Phaseolus</i> 2	-	2.480,00	Nenhum	3.746,30
Feijão <i>Vigna</i> 1	-	718	Nenhum	3.645,68
Feijão <i>Vigna</i> 2	-	718	Nenhum	3.645,68
Melancia 1	60	4.511,00	4511	Nenhum
Melancia 2	1.243	4.511,00	4123,51	4.511,00
Milho	-	987	Nenhum	4.260,57
Banana	1.542	9.011,00	4511	10.950,20
Mamão	1.200	36.260,00	5658,05	Nenhum
Limão	300	13.990,00	7223,23	Nenhum
Total	4.405			
Retorno financeiro (R\$)		67.643.677		

Em base aos valores de renda líquida equivalente, verifica-se que a cultura do mamão foi recomendada para cultivo numa área inferior à da banana, mesmo apresentando renda líquida superior; tal fato decorre da restrição de área máxima de cultivo para o mamoeiro 1.200 ha.

Considerando a cultura da melancia, constatou-se que o retorno monetário por unidade produzida desta cultura pode ser alterada para valores compreendidos no intervalo de R\$ 4.123,51 a R\$ 4.511,00 no modelo, sem que a solução ótima (cultivo de 1.243 ha) seja alterada.

No modelo, a cultura da abóbora no segundo período não foi recomendada no plano ótimo de cultivo, uma vez que toda área permitida para o seu plantio foi utilizada no primeiro período. Caso essa variável entre na solução ótima, poderá ter um valor máximo de receita marginal de R\$ 3.386,31, ou seja, este é o valor que poderá assumir sem alterar a solução.

Na análise de sensibilidade da função objetivo as culturas que não compõem o plano ótimo de cultivo apresentam apenas os limites máximos maiores que seu retorno unitário, isto indica os máximos valores que podem ser atribuídos aos coeficientes dessas variáveis na função objetivo, sem que a solução ótima seja alterada. Caso se tente viabilizá-las, acarretarão decréscimos na receita do projeto. Assim, enquanto o retorno monetário proporcionado pelo milho for inferior a R\$ 4.260,57 ele continuará não fazendo parte da base.

As culturas não recomendadas para cultivo, denominadas variáveis não básicas do modelo, apresentam custos marginais os quais se referem à redução da receita líquida por unidade de área cultivada. Na Tabela 4 são apresentados os custos marginais e o valor mínimo da contribuição ao lucro das referidas culturas.

Tabela 4. Custos marginais associados às atividades não básicas e valor mínimo da contribuição ao lucro.

Cultura	Época de sementeira	Custo Marginal (R\$)	Mínima Contribuição ao lucro (R\$)
Abóbora	Junho	484,31	3.386,31
Feijão <i>Phaseolus</i>	Junho	1.266,30	3.746,30
Feijão <i>Vigna</i>	Abril / Julho	2.927,68	3.645,68
Milho	Novembro	3.273,57	4.260,57

Não foram indicados os cultivos da abóbora e do feijão *Phaseolus* com sementeira em junho; neste caso existe um custo marginal associado a essas atividades, isto é, para cada hectare cultivado com abóbora nessa época promoverá uma redução de R\$ 484,31; cultivando-se o feijão *Phaseolus* a redução será de R\$ 1.266,30.

A cultura do milho não deverá ser recomendada enquanto sua contribuição ao lucro for inferior a R\$ 4.260,57. O feijão *Phaseolus* semeado em junho só participará da solução ótima se sua contribuição ao lucro for superior a R\$ 3.746,30. Esta cultura, semeada em março, constituiu-se numa solução básica apenas devido à necessidade de se cultivar no mínimo 30 ha para satisfazer a demanda interna.

A análise de sensibilidade das restrições de mercado e consumo interno está apresentada na Tabela 5.

Tabela 5. Análise de sensibilidade das restrições de mercado e consumo interno.

Restrições	Área ocupada (ha)	Quantidade de folga (ha)	Preço sombra (R\$/ha)	Área Mínima (ha)	Área Máxima (ha)
AREAMIN1	30	0	-484,31	0	1.025
AREAMIN3	30	0	-1.266,30	0	1.093
AREAMIN7	60	0	0	0	800
AREAMAX7	60	740	0	60	Nenhum
AREAMIN10	1.542	-42	0	Nenhum	1.542
AREAMIN11	1.200	-1.140	0	Nenhum	1.200
AREAMAX11	1.200	0	9.060,20	1.090	1.364
AREAMAX12	300	0	4.766,78	177	369

As restrições de área mínima de abóbora e feijão *Phaseolus*, apresentam valores de preço sombra negativos significando que a entrada dessas culturas na solução ótima, forçada pelas restrições, acarreta redução na receita líquida.

Caso a restrição AREAMIN3 (área mínima cultivada do feijão *Phaseolus* semeado em março), que tem como limite mínimo 30 ha, tivesse seu valor aumentado para 31 ha, os rendimentos econômicos da função objetivo seriam reduzidos em R\$ 1.266,30. Por outro lado, cada hectare de terra não cultivado dessa cultura, condicionaram ganhos de R\$ 1.266,30. O mesmo raciocínio se aplica a restrição AREAMIN1.

As culturas mamão e limão, restrições AREAMAX11 e AREAMAX12, apresentam valores de preço sombra positivos indicando que, caso ocorra aumento em suas áreas máximas de plantio, haverá, conseqüentemente, maior rendimento financeiro. Assim, para cada hectare adicional de mamão, dentro dos intervalos 1.090 a 1.394 ha, implicaria num ganho de R\$ 9.060,20.

A restrição imposta à cultura da banana AREAMIN10 apresenta preço sombra zero nos dois modelos estudados. Assim, se a área da banana for aumentada ou reduzida dos 1.542 ha, as variáveis básicas que compõem a solução ótima não serão alteradas, contudo os valores da função objetivo serão alterados.

A Tabela 6 apresenta a análise de sensibilidade do recurso terra ocupada mensalmente.

Tabela 6. Análise de sensibilidade do recurso terra ocupada mensalmente.

Mês	Área ocupada (ha)	Quantidade de folga (ha)	Preço sombra (R\$ ha ⁻¹)	Área Mínima (ha)	Área Máxima (ha)
Janeiro	3.042	1.363	0	3.042	Nenhum
Fevereiro	3.072	1.333	0	3.072	Nenhum
Março	3.102	1.303	0	3.102	Nenhum
Abril	3.162	1.243	0	3.162	Nenhum
Mai	3.132	1.273	0	3.132	Nenhum
Junho	3.102	1.303	0	3.102	Nenhum
Julho	4.285	120	0	4.285	Nenhum
Agosto	4.285	120	0	4.285	Nenhum
Setembro	4.285	120	0	4.285	Nenhum
Outubro	3.042	1.363	0	3.042	Nenhum
Novembro	3.042	1.363	0	3.042	Nenhum
Dezembro	3.042	1.363	0	3.042	Nenhum

Observa-se que em todos os meses do ano, as áreas ocupadas nunca atingiram o valor da área disponível 4.405 ha, conseqüentemente, todos apresentam folga e o preço sombra é zero, indicando que o recurso terra não foi restritivo. Observa-se ainda que as áreas ocupadas mensalmente só apresentam limites de áreas mínimas, ou seja, mínimo valor de área que pode ser utilizado, sem que as variáveis básicas da solução ótima (culturas) sejam modificadas. A maior ocupação corresponde aos meses entre julho e setembro, período do ciclo da cultura da melancia. A área média anual ocupada foi de 3.383 ha.

A análise de sensibilidade do volume de água mensal e anual está apresentadas na Tabela 7, considerando-se uma disponibilidade anual máxima de 79.649.300 m³ e mensal de 10.833.500 m³.

Tabela 7. Análise de sensibilidade do volume de água mensal e anual.

Mês	Volume Utilizado (1.000m ³)	Quantidade de Folga (1.000m ³)	Preço Sombra (R\$/1.000 m ³)	Volume Mínimo (1.000m ³)	Volume Máximo (1.000m ³)
Janeiro	6.360	4.473	0	6.360	Nenhum
Fevereiro	5.551	5.282	0	5.551	Nenhum
Março	5.552	5.281	0	5.552	Nenhum
Abril	5.110	5.723	0	5.110	Nenhum
Mai	5.069	5.765	0	5.069	Nenhum
Junho	4.459	6.375	0	4.459	Nenhum
Julho	6.858	3.976	0	6.858	Nenhum
Agosto	9.507	1.326	0	9.507	Nenhum
Setembro	10.610	224	0	10.610	Nenhum
Outubro	7.685	3.149	0	7.685	Nenhum
Novembro	6.511	4.323	0	6.511	Nenhum
Dezembro	6.376	4.457	0	6.376	Nenhum
Água Total	79.649	0	223,60	78.809	99.499

Observa-se que a disponibilidade anual de água no PIF constitui uma restrição efetiva ao sistema de produção. O padrão ótimo de cultivo determinado na solução dos modelos resultou no consumo de todo o volume disponível. Como o volume anual mostrou ser um recurso escasso, ao mesmo está associado um preço sombra (custo de oportunidade de se utilizar um determinado volume de água) o qual corresponde à redução esperada no valor da função objetivo caso tal volume se torne mais restritivo em uma unidade. Neste caso, redução unitária de água total (1 m³) entre os volumes anuais disponíveis de 79.649.300 a 78.809.000 m³, diminuiria o valor da função objetivo em R\$ 223,40, sem provocar alteração nas variáveis básicas da solução ótima. Por outro lado, cada unidade adicional de água de 79.649.300 m³ a 99.499.000 m³ aumentaria o valor da função objetivo nas mesmas quantidades de unidades monetárias.

A disponibilidade mensal de água não foi limitante. O volume de água utilizado mensalmente sempre foi menor que o valor disponível (10.833.500 m³), portanto, apresentam folga e o preço sombra é zero, indicando que o recurso volume máximo mensal de água que pode ser bombeado para área de colonização não é restritivo quando o volume anual disponível é 79.649.300 m³.

Os valores mínimos e máximos para os volumes de água (Tabelas 7) representam os limites de disponibilidade de água para os quais o preço sombra é válido e a solução ótima atual não é alterada, entretanto podem se modificar os valores das áreas cultivadas. A disponibilidade anual de água pode variar entre 78.809.000 m³ e 99.499.000 m³ sem que a solução ótima e o preço sombra se alterem.

6 CONCLUSÕES

A maximização da receita líquida no Perímetro Irrigado Formoso, obtida com o modelo de programação linear com lâminas máximas de água, foi de R\$ 67.643.676,78, utilizando o seguinte padrão de cultivo: 30 ha de abóbora, 30 ha de feijão Phaseolus, 1.243 ha de melancia, 1.542 ha de banana, 1.200 ha de mamão e 300 ha de limão Tahiti, para o volume anual de 79.649.300 m³.

A programação linear mostrou-se eficaz na análise e proposta de um plano ótimo de cultivo para as áreas familiares do Perímetro Irrigado Formoso.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CASTRO, R. P.; COSTA, R. N. T.; SILVA, L. A. C.; GOMES FILHO, R. R. Modelos de decisão para otimização econômica do uso da água em áreas irrigadas da Fazenda Experimental Vale do Curu, Pentecoste – CE. **Irriga**, Botucatu, v. 12, n. 3, p. 377-392, 2007.
- CODEVASF. 2ª Superintendência Regional. **Plano de assistência técnica e extensão rural do Perímetro de Irrigação Formoso para 2010**. Bom Jesus da Lapa, 2009. 59 p.
- CODEVASF. 2ª Superintendência Regional. **Diagnóstico socioeconômico e ambiental dos lotes familiares do Perímetro de Irrigação Formoso**. Bom Jesus da Lapa, 2010. 121 p.
- CODEVASF. 2ª Superintendência Regional. **Relatório semestral nº 2**. Bom Jesus da Lapa, 2011. 29 p.
- DANTAS NETO, J.; AZEVEDO, C.A.V.; FRIZZONE, J.A. Uso da programação linear para estimar o padrão de cultura do perímetro irrigado Nilo Coelho. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 1, n. 1, p. 9-12, 1997.
- DELGADO, A. R. S.; DUARTE, W. S.; LIMA, V. N.; CARVALHO, D. F. Modelagem matemática para otimização da produção e renda de melão e melancia em função de lâminas de água e doses de Nitrogênio. **Irriga**, Botucatu, v. 15, n. 1, p. 1-9, 2010.
- FRIZZONE, J.A. Otimização em irrigação com déficit. In: Paz, V.S.P.; OLIVEIRA, A.S.; PEREIRA, F.A.C.; GHEYI, H.G. (Ed.). **Manejo e sustentabilidade da irrigação em regiões áridas e semi-áridas**. Cruz das Almas: UFRB, Núcleo de Engenharia de Água e Solo, 2009. p. 273-308.
- GORANTIWAR, S.D.; SMOUT, I.K. Allocation of scarce water resources using deficit irrigation in rotational systems. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**. New York, v. 129, n. 3, p. 155-163, 2003.
- RODRIGUES, J.A.L.; COSTA, R.N.T.; FRIZZONE, J.A.; AGUIAR, J.V. Plano ótimo de cultivo no projeto de irrigação Morada Nova, Ceará, utilizando modelo de programação linear. **Irriga**, Botucatu, v. 5, n. 3, p. 199-221, 2000.
- SANTOS, M. A. L.; COSTA, R. N. T.; AGUIAR, J. V. ; TEIXEIRA, A.S.; GOMES FILHO, R. R. Otimização econômica da exploração agrícola para o Distrito de Irrigação Baixo Acaraú - CE, utilizando modelo de programação linear. **Irriga**, Botucatu, v. 10, n. 1, p. 30-45, 2005.
- SOARES, J.I.; COSTA, R.N.T.; SILVA, L.A.C.; GONDIM, R.S. Função de resposta da melancia aos níveis de água e adubação nitrogenada, no Vale do Curu, CE. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 6, n. 2, p. 219-224, jul./ago. 2002.