

OTIMIZAÇÃO ECONÔMICA DA EXPLORAÇÃO AGRÍCOLA PARA O DISTRITO DE IRRIGAÇÃO BAIXO ACARAÚ - CE, UTILIZANDO MODELO DE PROGRAMAÇÃO LINEAR

Márcio Aurélio Lins dos Santos¹; Raimundo Nonato Távora Costa²; José Vanglésio de Aguiar²; Adunias dos Santos Teixeira²; Raimundo Rodrigues Gomes Filho³

¹Departamento de Engenharia Rural, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Caixa Postal 9, CEP 14918-900, Piracicaba, SP, malsanto@esalq.usp.br

² Departamento de Engenharia Agrícola, Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE

³ Instituto Centro de Ensino Tecnológico, Curso de Tecnologia da Irrigação, Sobral, CE

1 RESUMO

O objetivo do presente trabalho consistiu em propor alternativas das culturas e respectivas áreas a serem estabelecidas no Distrito de Irrigação Baixo Acaraú-CE, utilizando modelo de programação linear. O modelo de otimização visou a maximização da receita líquida do produtor, incorporando as restrições de disponibilidade de água, terra e mercado. Tomando-se por base as culturas consideradas, as restrições de área, água e mercado, os preços dos produtos e custos de produção, os resultados do estudo permitiram as seguintes conclusões: 1. A disponibilidade de água prevista para o Distrito para áreas de pequenos produtores, de técnicos em ciências agrárias e empresariais, se mostrou limitante no mês de outubro quanto ao uso total do recurso terra, ao considerar-se o estabelecimento das culturas propostas no plano que apresentou a melhor alternativa econômica; 2. A combinação de cultivo constituída por meloeiro no mês de maio, meloeiro no mês de setembro e milho verde foi a que apresentou maior nível de receita líquida para áreas de pequenos produtores, de técnicos em ciências agrárias e empresariais, correspondendo a R\$13.909,00/ha/ano para pequenos produtores e técnicos em ciências agrárias e R\$14.547,00 para empresários; 3. A análise de sensibilidade do recurso terra do plano ótimo de cultivo, apresentou preço-sombra diferente de zero no período de fevereiro a julho, indicando que esse recurso foi restritivo.

UNITERMOS: programação linear, padrão de cultivo, irrigação.

**SANTOS, M. A. L.; COSTA, R. N. T.; AGUIAR, J. V.; GOMES FILHO, R. R.
A LINEAR PROGRAMMING MODEL FOR ECONOMICAL OPTIMIZATION OF
AGRICULTURAL EXPLORATION TO THE IRRIGATION DISTRICT
OF SHALLOW ACARAÚ**

2 ABSTRACT

The aim of this work was to propose the "best" combination of crop types and respective areas for the Irrigation District of Baixo Acaraú-CE, using a linear programming (LP) algorithm. The optimization model aimed to maximize the producer's net profit incorporating the constraints for water and land availability, and for the market. Considering crop types, land, water and market constraints, commodities and production costs, the study has concluded the following: 1. The availability of water to the Irrigation District of Baixo Acaraú for small farmers, entrepreneur technicians and corporations, was limited in the month of October for the total use of land if the presented culture proposals as the best economic alternative were

considered; 2. The cultivation combination constituted by melon in May, melon in September and maize has shown greater net profit for small farmers, technicians and entrepreneurs corresponding to R\$13,909.00/ha/year for small farmers, entrepreneur technicians and R\$14,547.00/ha/year for Corporations; 3. The analysis of land sensitivity in the excellent cultivation plan presented price-shade different from zero from February to July, indicating that this resource was restrictive.

KEYWORDS: linear programming, cropping pattern, irrigation.

3 INTRODUÇÃO

A programação linear consiste na maximização ou minimização de uma função linear, denominada função-objetivo, respeitando-se um sistema linear de igualdades ou desigualdades que recebem o nome de restrições do modelo. As restrições representam normalmente limitações de recursos disponíveis (capital, mão-de-obra, recursos minerais ou fatores de produção) ou, então, exigências e condições que devem ser cumpridas no problema. Essas restrições do modelo determinam uma região à qual dá-se o nome de conjunto das soluções viáveis. A melhor das soluções viáveis, isto é, aquela que maximiza ou minimiza a função objetivo denomina-se solução ótima. O objetivo da programação linear consiste na determinação dessa solução ótima (BREGALDA et al., 1981).

Quando um agricultor procura otimizar sua decisão, entre as alternativas de produção disponíveis, ele deve escolher a mais eficiente na utilização dos recursos produtivos e a que satisfaz a certos objetivos pré-estabelecidos. Nas situações em que a tomada de decisão está relacionada à alocação de recursos escassos, são necessários métodos eficientes que auxiliem o planejador no processo decisório. Para resolver esse tipo de problema, os modelos matemáticos são os mais indicados, capazes de quantificar de maneira ótima o uso dos recursos limitados (terra, água, capital, mão-de-obra, equipamentos, tempo, etc.), maximizando algum índice de desempenho ou minimizando alguma medida de custo (FRIZZONE, 1995).

De acordo com 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 os lucros nas áreas irrigadas. Frizzone (1996), utilizando funções de resposta das culturas à água, constatou em base a modelo de otimização utilizando programação linear, ser possível um incremento na renda líquida de 52,34%, se comparada à renda obtida com o plano de cultivo tradicional no Distrito de Irrigação Senador Nilo Coelho no ano agrícola de 1992.

O objetivo do presente trabalho consiste em propor alternativas às culturas e respectivas áreas que foram estabelecidas no Distrito de Irrigação Baixo Acaraú-CE, para lotes de 8 ha (pequenos produtores), 16 ha (técnicos em ciências agrárias) e 80 ha (lotes empresariais), que proporcionem a maximização da renda do produtor, incorporando as restrições de disponibilidade de água, terra e mercado.

4 MATERIAL E MÉTODOS

O Distrito de Irrigação Baixo Acaraú localiza-se na região Norte do Estado do Ceará, à margem direita do Rio Acaraú, compreendendo terras dos municípios de Acaraú, Bela Cruz e Marco, a 217 km de Fortaleza, com acesso através das rodovias BR-222, CE-016 e CE-161/BR-403, com as seguintes coordenadas geográficas: latitude sul 03°01' a 03°22'; longitude oeste 40°01' a 40°09'. A área do projeto está compreendida entre as altitudes de 36 e 56 m.

O distrito utilizará recursos hídricos do Rio Acaraú, cujos principais açudes são: Araras (Paulo Sarasate), volume de reserva de $8,9 \times 10^8 \text{ m}^3$, vazão regularizada de $9,2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; Edson

Queiroz, volume de reserva de $2,5 \times 10^8 \text{ m}^3$, vazão regularizada de $1,8 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; Jaibaras (Aires de Souza), volume de reserva de $1,0 \times 10^8 \text{ m}^3$, vazão regularizada de $1,9 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ e Acaraú Mirim, volume de reserva de $0,5 \times 10^8 \text{ m}^3$, vazão regularizada de $0,3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

De acordo com a classificação de Köppen, o clima da área é AW', quente e úmido com chuvas de verão-outono, registrando temperaturas médias mensais superiores a 18°C e mais ou menos constantes no decorrer do ano, com amplitude térmica sempre inferior a 5°C . A pluviosidade média anual é 938 mm com estação chuvosa ocorrendo geralmente de janeiro a junho, concentrando 80 % nos meses de fevereiro a maio. A evapotranspiração de referência média anual é de 1600mm. Os valores médios anuais de temperatura e umidade relativa do ar são de 28°C e 70%, respectivamente. A velocidade média anual dos ventos é de $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, com direção predominante leste ou sudeste. Há predominância de solos com textura arenosa, bastante profundos, das classes dos Podzólicos, Latossolos e Areias Quartzosas, conferindo uma alta taxa de infiltração e boa drenagem interna do perfil.

O modelo de programação linear proposto consistiu de uma função-objetivo, sujeita às restrições no uso dos recursos terra, água e mercado, visando à maximização da receita líquida do produtor. Tendo em vista a diferença nas restrições de água e terra para as áreas de pequenos produtores, técnicos em ciências agrárias e empresariais, a formulação geral do modelo foi processada separadamente para cada um dos segmentos.

Conforme Hillier & Lieberman (1988), a otimização da função-objetivo consiste na determinação dos valores associados às variáveis X_i , que satisfaçam às condições de linearidade.

A formulação geral do modelo proposto é representada pelas seguintes equações:

$$\text{MAX RL} = \sum_{i=1}^n P_i Y_i X_i - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m A_{ij} C_{ij} X_i \quad (01)$$

tendo como restrições:

$$\sum_{i=1}^n (W_{ih} / E) X_i \leq VM_h \quad (i = 1, \dots, n; \quad h = 1, \dots, 12) \quad (02)$$

$$\sum_{i=1}^n A_{ij} X_i \leq D_j \quad (i = 1, \dots, n; \quad \forall j) \quad (03)$$

$$X_i \geq 0 \quad (\text{não-negatividade}) \quad (04)$$

sendo:

- RL - Receita líquida total do lote (R\$);
- I - Número inteiro representando a cultura ($i = 1, \dots, n$);
- J - Número inteiro representando os insumos ($j = 1, \dots, m$);
- H - Número inteiro representando o mês do ano ($h = 1, \dots, 12$);
- P_i - Preço unitário do produto da i -ésima cultura ($\text{R}\$. \text{kg}^{-1}$);
- X_i - Área cultivada com a i -ésima cultura (ha);
- Y_i - Produtividade obtida da i -ésima cultura ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$);
- A_{ij} - Quantidade demandada do insumo j pela cultura i ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$);
- C_{ij} - Custo unitário do insumo j pela cultura i ($\text{R}\$. \text{kg}^{-1}$);
- W_{ih}/E - Lâmina bruta mensal de água para irrigar a i -ésima cultura (mm);
- E - Eficiência de aplicação d'água (forma decimal);
- VM_h - Volume mensal de água disponível (mm.ha);
- D_j - Disponibilidade máxima do insumo j .

As variáveis ou culturas (X_i) utilizadas na formulação do modelo foram:

Abacaxizeiro ($i=1$); Bananeira ($i=2$); Coqueiro ($i=3$); Goiabeira ($i=4$); Gravioleira ($i=5$); Mamoeiro ($i=6$); Mangueira ($i=7$); Maracujazeiro ($i=8$); Meloeiro I ($i=9$); Meloeiro II ($i=10$); Milho Verde ($i=11$); Videira ($i=12$).

Admitiu-se que não haverá restrição de capital para a implantação das culturas, podendo os produtores captar recursos na rede bancária, e nem restrição de mão-de-obra, podendo esta ser contratada nos municípios de Marco, Bela Cruz, Acaraú e outros municípios circunvizinhos.

Os coeficientes da função-objetivo representam a renda líquida por unidade de área para cada uma das culturas (R\$.ha⁻¹). Para obtenção de referidos coeficientes, realizou-se um fluxo de caixa para um período de quinze anos, em base aos preços dos produtos, níveis de produtividade e custos de produção ao longo do período considerado na análise. O modelo estudado foi representado pela seguinte função-objetivo:

$$\text{Max RL} = (1217,2X_1 + 3927,6X_2 + 1023,3X_3 + 293,2X_4 + 3632,4X_5 + 2813,2X_6 + 3015,3X_7 + 3505,9X_8 + 6867,6X_9 + 6867,6X_{10} + 2154,9X_{11} + 2642,0X_{12}) \quad (05)$$

sendo:

Max RL	Maximização da receita líquida;
X ₁	Área cultivada com abacaxi (ha);
X ₂	Área cultivada com banana (ha);
X ₃	Área cultivada com coco (ha);
X ₄	Área cultivada com goiaba (ha);
X ₅	Área cultivada com graviola (ha);
X ₆	Área cultivada com mamão (ha);
X ₇	Área cultivada com manga (ha);
X ₈	Área cultivada com maracujá (ha);
X ₉	Área cultivada com melão no mês de fevereiro (ha);
X ₁₀	Área cultivada com melão no mês de setembro (ha);
X ₁₁	Área cultivada com milho (ha);
X ₁₂	Área cultivada com uva (ha).

No cálculo dos requerimentos mensais de água das culturas perenes considerou-se a necessidade mensal durante o período de franca produção, estabelecendo-se o seguinte procedimento:

- Evapotranspiração de referência (ET_o) – através do método de Penman-Monteih, utilizando o software CROPWAT da FAO.
- Coeficientes das culturas (Kc) – para estágio de pleno desenvolvimento das culturas. Na cultura do melão, utilizaram-se valores de Kc para cada estágio de desenvolvimento.
- Evapotranspiração máxima (ETm) – obtida através da expressão: ETm = ET_o x Kc.
- Precipitação efetiva (Pe) – calculada conforme com a expressão: Pe = (125 - 0,2P_m)P_m/125, sendo P_m a precipitação média (CROPWAT da FAO)
- Necessidade de Irrigação (NI) – calculada conforme equação: NI = ETm – Pe.
- Requerimento mensal de irrigação ou lâmina bruta (Lb) – calculada através da expressão: Lb = NI/Ea;
- Eficiência global de aplicação de água (Ea) - definida conforme equação: Ea = k_s x C_u, sendo k_s o coeficiente de armazenamento de água no solo e C_u o coeficiente de uniformidade de distribuição.

Os requerimentos mensais de irrigação das culturas são apresentados no Quadro 1.

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 o respectivo mês. 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.

A vazão específica ou unitária utilizada para fins de cálculo do volume disponível no mês mais crítico (outubro), foi de 1,15 L.s⁻¹.ha⁻¹ para pequenos produtores e técnicos em

ciências agrárias e de $1,30 \text{ L.s}^{-1}.\text{ha}^{-1}$ para lotes empresariais. Tendo-se como base que respectivas vazões unitárias estarão disponíveis durante 20 horas por dia, os volumes de água mensal que comporão as restrições serão de $2.053,4 \text{ mm.ha/mês}$ (20.534 m^3) para os lotes de pequenos produtores, $4.106,8 \text{ mm.ha/mês}$ (41.068 m^3) para os lotes de técnicos em ciências agrárias e de $23.212,8 \text{ mm.ha/mês}$ (232.128 m^3) para lotes empresariais. As equações referentes às restrições de água estão enumeradas de (06) a (17).

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 áreas de 8,0 ha, 16,0 ha e 80,0 ha respectivamente para pequenos produtores, técnicos em ciências agrárias e empresários. As equações referentes às restrições de área estão enumeradas de (18) a (29).

Quadro 1. Requerimentos mensais de água (mm) das culturas estudadas (AM)

Meses	Abacaxi (X ₁)	Banana (X ₂)	Coco (X ₃)	Goiaba (X ₄)	Graviola (X ₅)	Mamão (X ₆)
Janeiro	62,2	52,7	28,6	-	30,7	72,2
Fevereiro	-	-	-	-	-	-
Março	-	-	-	-	-	-
Abril	-	-	-	-	-	-
Maio	-	-	-	-	-	-
Junho	76,8	68,2	46,3	13,8	48,2	86,3
Julho	133,9	124,4	99,8	63,6	101,9	144,6
Agosto	182,4	170,7	141,0	97,1	143,6	194,3
Setembro	187,9	175,9	145,3	100,1	148,0	201,3
Outubro	198,5	186,1	153,9	106,5	156,7	212,6
Novembro	182,4	170,6	140,3	95,4	142,9	195,6
Dezembro	140,3	129,1	100,7	58,6	103,1	152,7
Total	1164,4	1077,7	855,9	535,1	875,1	1259,6

Quadro 1. Continuação

Meses	Manga (X ₇)	Maracujá (X ₈)	Melão I (X ₉)	Melão II (X ₁₀)	Milho (X ₁₁)	Uva (X ₁₂)
Janeiro	24,4	-	-	-	-	68,5
Fevereiro	-	-	-	-	-	-
Março	-	-	-	-	-	-
Abril	-	-	-	-	-	-
Maio	-	-	-	-	-	-
Junho	42,4	19,5	187,5	-	-	82,5
Julho	95,6	70,0	151,0	-	-	140,3
Agosto	135,8	104,8	-	-	-	190,1
Setembro	140,0	108,1	-	195,9	-	195,9
Outubro	148,4	114,8	-	360,7	-	207,0
Novembro	134,9	103,3	-	203,5	-	190,3
Dezembro	95,7	66,0	-	-	-	147,7
Total	817,2	586,5	338,5	760,1	-	1222,3

A.1) Restrição de água para pequenos produtores

$$IJAN = \sum_{i=1}^{12} AM * X_i \leq 2053,4 \text{ mm.ha} \quad (06)$$

$$IFEV = \sum_{i=1}^{12} AM * X_i \leq 2053,4 \text{ mm.ha} \quad (07)$$

$$IMAR = \sum_{i=1}^{12} AM * X_i \leq 2053,4 \text{ mm.ha} \quad (08)$$

$$IABR = \sum_{i=1}^{12} AM * X_i \leq 2053,4 \text{ mm.ha} \quad (09)$$

$$IMAI = \sum_{i=1}^{12} AM * X_i \leq 2053,4 \text{ mm.ha} \quad (10)$$

$$IJUN = \sum_{i=1}^{12} AM * X_i \leq 2053,4 \text{ mm.ha} \quad (11)$$

$$IJUL = \sum_{i=1}^{12} AM * X_i \leq 2053,4 \text{ mm.ha} \quad (12)$$

$$IAGO = \sum_{i=1}^{12} AM * X_i \leq 2053,4 \text{ mm.ha} \quad (13)$$

$$ISET = \sum_{i=1}^{12} AM * X_i \leq 2053,4 \text{ mm.ha} \quad (14)$$

$$IOUT = \sum_{i=1}^{12} AM * X_i \leq 2053,4 \text{ mm.ha} \quad (15)$$

$$INOV = \sum_{i=1}^{12} AM * X_i \leq 2053,4 \text{ mm.ha} \quad (16)$$

$$IDEZ = \sum_{i=1}^{12} AM * X_i \leq 2053,4 \text{ mm.ha} \quad (17)$$

sendo:

IJAN volume de água mensal disponível, no mês de janeiro, em mm.ha;

IFEV volume de água mensal disponível, no mês de fevereiro, em mm.ha;

INOV volume de água mensal disponível, no mês de novembro, em mm.ha;

IDEZ volume de água mensal disponível, no mês de dezembro, em mm.ha.

B.1) Restrição de área para pequenos produtores

$$AJAN = \sum_{i=1}^{12} X_i - \sum_{i=9}^{11} X_i \leq 8 \text{ ha} \quad (18)$$

$$AFEV = \sum_{i=1}^{12} X_i - \sum_{i=9}^{10} X_i \leq 8 \text{ ha} \quad (19)$$

$$AMAR = \sum_{i=1}^{12} X_i - \sum_{i=9}^{10} X_i \leq 8 \text{ ha} \quad (20)$$

$$AABR = \sum_{i=1}^{12} X_i - \sum_{i=9}^{10} X_i \leq 8 \text{ ha} \quad (21)$$

$$AMAI = \sum_{i=1}^{12} X_i - \sum_{i=10}^{11} X_i \leq 8 \text{ ha} \quad (22)$$

$$AJUN = \sum_{i=1}^{12} X_i - \sum_{i=10}^{11} X_i \leq 8 \text{ ha} \quad (23)$$

$$AJUL = \sum_{i=1}^{12} X_i - \sum_{i=10}^{11} X_i \leq 8 \text{ ha} \quad (24)$$

$$AAGO = \sum_{i=1}^{12} X_i - \sum_{i=9}^{11} X_i \leq 8 \text{ ha} \quad (25)$$

$$ASET = \sum_{i=1}^{12} X_i - X_9 - X_{11} \leq 8 \text{ ha} \quad (26)$$

$$AOUT = \sum_{i=1}^{12} X_i - X_9 - X_{11} \leq 8 \text{ ha} \quad (27)$$

$$ANOV = \sum_{i=1}^{12} X_i - X_9 - X_{11} \leq 8 \text{ ha} \quad (28)$$

$$ADEZ = \sum_{i=1}^{12} X_i - \sum_{i=9}^{11} X_i \leq 8 \text{ ha} \quad (29)$$

sendo:

- AJAN área irrigada no mês de janeiro;
 AFEV área irrigada no mês de fevereiro;
 ANOV área irrigada no mês de novembro;
 ADEZ área irrigada no mês de dezembro.

Incorporou-se ao modelo uma restrição de área máxima a ser cultivada com coqueiro, correspondendo a 20% da área agrícola do produtor, fundamentada em estudos de mercado.

C.1) Restrições de mercado para áreas de pequenos produtores

$$X_3 \leq 1,6 \text{ ha} \quad (30)$$

C.2) Restrição de mercado para áreas de técnicos em ciências agrárias

$$X_3 \leq 3,2 \text{ ha} \quad (31)$$

C.3) Restrição de mercado para áreas empresariais

$$X_3 \leq 16 \text{ ha} \quad (32)$$

Na resolução do modelo de programação linear utilizou-se o programa de computação denominado LINDO (LINEAR INTERACTIVE AND DISCRETE OPTIMIZER, 1996), o qual resolve sistemas de equações lineares, utilizando o algoritmo iterativo “método simplex revisado”.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O modelo proposto resultou no plano ótimo de cultivo apresentado no Quadro 2.

Quadro 2. Solução ótima do modelo de programação linear

Tipos de Lotes	Culturas	Lâmina total (mm)	C.T.F.O. ⁽¹⁾ (R\$. ha ⁻¹)	Área (ha)
Pequeno Produtor	Melão maio	338,5	6867,00	8,0
	Melão setembro	760,1	6867,00	5,7
	Milho verde	0,0	2155,00	8,0
Técnico em Ciências Agrárias	Melão maio	338,5	6867,00	16,0
	Melão setembro	760,1	6867,00	11,4
	Milho verde	0,0	2155,00	16,0
Empresarial	Melão maio	338,5	6867,00	80,0
	Melão setembro	760,1	6867,00	64,4
	Milho verde	0,0	2155,00	80,0

⁽¹⁾ Coeficiente Técnico da Função-objetivo.

O plano que contempla o maior nível de receita líquida sugere o cultivo do meloeiro no mês de maio, meloeiro no mês de setembro e milho verde para todos os tipos de lotes. O modelo sugere o aproveitamento de 100% da área agrícola com o cultivo do meloeiro no mês de maio e milho verde. Já o cultivo do meloeiro no mês de setembro ocupou 71,2%, para áreas de pequenos produtores quanto para áreas de técnicos em ciências agrárias e 80,5% para áreas empresariais. Nessa condição, tem-se a aplicação de uma lâmina total de água de irrigação de 338,5mm e de 760,1mm respectivamente para as culturas do meloeiro no mês de maio e meloeiro no mês de setembro. A cultura do milho verde não apresentou demanda de água de irrigação no período. A cultura do meloeiro no mês de maio apresentou área de cultivo maior que o meloeiro no mês de setembro, fato decorrente do meloeiro no mês de setembro demandar aproximadamente 2,2 vezes mais água de irrigação quando comparado com o meloeiro no mês de maio.

Uma análise comparativa das combinações de cultivo propostas demonstra que os maiores níveis de receitas líquidas médias anuais são de R\$13.909,00/ha/ano para áreas de pequenos produtores e de técnicos em ciências agrárias e de R\$14.547,00/ha/ano para áreas empresariais.

No Quadro 3 são apresentados os resultados de um plano alternativo contemplando apenas a inclusão de culturas permanentes, ou seja; excluindo exatamente as culturas sugeridas no plano de maior nível de receita líquida média anual. Considerando a condição de disponibilidade de água conforme prevista no distrito, o modelo sugere a ocupação de toda a área com a cultura da bananeira, alternativa esta que apresentaria uma redução no nível médio anual de receita líquida da ordem de 71,7%, se comparado ao plano ótimo de cultivo que sugere os cultivos de meloeiro e milho verde. A recomendação da cultura da bananeira ocorreria em razão de apresentar um maior coeficiente na função-objetivo, se comparado aos coeficientes das demais culturas permanentes, bem como em razão do recurso água ter apresentado folga nos diversos meses do ano.

Quadro 3. Solução ótima do modelo incluindo-se apenas culturas permanentes

Tipo de lote	Cultura	Área (ha)
Pequeno Produtor	Bananeira	8,0
Técnico em Ciências Agrárias	Bananeira	16,0
Empresarial	Bananeira	80,0

Admitindo-se a restrição de terra por ser estática, não podendo assim ser aumentada, verifica-se para o plano ótimo que contempla os cultivos do meloeiro e milho-verde, um uso total desse recurso nos meses de fevereiro a julho. O referido plano sugere a não ocupação da terra durante três meses do ano, sendo estes o mês de agosto, utilizado para preparo da área e sistema de irrigação para novo estabelecimento da cultura do meloeiro, e os meses de dezembro e janeiro, os quais o recurso terra deve permanecer em pousio.

No Quadro 4 discrimina-se mensalmente o volume de água consumido conforme o modelo estudado. Verifica-se que no mês mais crítico (outubro) houve demanda maior que os volumes de água ofertados para as áreas de pequenos produtores, de técnicos em ciências agrárias e empresariais. Tendo em vista que não houve folga no mês de outubro, o preço-sombra foi de R\$19,00, ou seja, para cada 10 m³ do recurso água usado a mais no mês de outubro aumentaria o valor da receita líquida em R\$19,00, e cada 10 m³ utilizado a menos, reduziria a receita líquida na mesma quantidade. Houve ocorrência de folga desse recurso nos demais meses, tendo-se portanto um preço-sombra igual a zero, significando que o volume mensal de água disponível nesses meses não é restritivo ao volume mensal de água requerido.

Quadro 4. Consumo de água (m³) estimado pelo modelo proposto

Mês	Pequenos Produtores	Técnicos em Ciências Agrárias	Empresariais
Janeiro	0,0	0,0	0,0
Fevereiro	0,0	0,0	0,0
Março	0,0	0,0	0,0
Abril	0,0	0,0	0,0
Mai	0,0	0,0	0,0
Junho	15000,0	31350,0	150000,0
Julho	12080,0	24160,0	120800,0
Agosto	0,0	0,0	0,0
Setembro	11150,5	22310,0	126100,0
Outubro	28850,5	57710,0	288550,2
Novembro	11580,7	23170,4	130980,5
Dezembro	0,0	0,0	0,0
Disponibilidade mensal de água	20530,4	41060,8	232120,8

Numa análise comparativa entre um plano ótimo de cultivo e o plano de cultivo utilizado no PIMN, Ceará, Rodrigues (2000) observou em base aos dados do plano proposto, uma folga no volume mensal de água disponível, caracterizando assim uma condição de não restrição de água, ou seja, preço-sombra igual a zero. Já Dantas Neto (1994), em estudo semelhante para as condições do Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho, verificou a não existência de folga, tendo dessa forma um valor associado a uma unidade do recurso água, que é o preço-sombra.

Os preços-sombra e os valores mínimos da contribuição ao lucro das variáveis não básicas (culturas não recomendadas), são apresentados no Quadro 5. De acordo com Frizzone (1996) e Rodrigues (2000), as variáveis não básicas na solução do modelo, apresentam preços-sombra, os quais se referem ao acréscimo do custo total atribuível por unidade de área cultivada, e os valores mínimos da contribuição ao lucro atribuídos às culturas, os quais representam os valores mínimos para que seus cultivos possam ser indicados. Por exemplo, o cultivo da mangueira não foi recomendado, neste caso existe um preço-sombra associado a essa atividade, ou seja, para cada hectare cultivado de mangueira ocorreria uma redução de R\$8.832,00 na receita líquida, e o cultivo da mangueira não poderá ser recomendado, enquanto sua receita líquida for inferior a R\$11.847,00 por hectare.

Quadro 5. Preços-sombra associados às atividades não básicas e valor mínimo da contribuição ao lucro*

Culturas	Custo Marginal (R\$ ha ⁻¹)	Mínima Contribuição ao Lucro (R\$ ha ⁻¹)
Abacaxizeiro	11585,00	12802,00
Bananeira	8638,00	12565,00
Coqueiro	10931,00	11954,00
Goiabeira	10756,00	11049,00
Graviroleira	8375,00	12007,00
Mamoeiro	10258,00	13071,00
Mangueira	8832,00	11847,00
Maracujazeiro	7703,00	11209,00
Videira	10322,00	12964,00

*Para os três tipos de áreas agrícolas.

No sentido de observar os intervalos possíveis nos coeficientes do modelo proposto e o comportamento das variáveis, sem que a solução básica originalmente encontrada seja modificada, alterando-se no entanto o valor da função-objetivo, realizou-se uma análise de sensibilidade.

A análise de sensibilidade de uma atividade básica compreende as possíveis variações na sua receita líquida sem causar alteração nos níveis da solução ótima (FRIZZONE, 1996 e RODRIGUES, 2000). No Quadro 6 são apresentados os valores atuais utilizados no modelo e os intervalos permitidos à receita líquida obtidos na solução ótima do problema, cujos limites são identificados pelas receitas líquidas mínimas e máximas e valores utilizados no modelo, identificado como atual.

Os dados demonstram que os cultivos do meloeiro no mês de maio, meloeiro no mês de setembro e milho verde, permanecerão na base, ou seja; com os mesmos valores de áreas sugeridas na solução ótima do modelo, para qualquer valor positivo na receita líquida unitária dessas variáveis, numa condição de análise individual de cada uma dessas variáveis básicas, com tudo mais permanecendo constante.

Quadro 6. Análise de sensibilidade da receita líquida das variáveis básicas

Tipo de área	Variável	Valor da Variável (ha)	Receita líquida (R\$ há ⁻¹)		
			Mínima	Atual	Máxima
Pequeno Produtor	Melão maio	8,0	> Zero	6867,00	****
	Melão set.	5,7	> Zero	6867,00	****
	Milho verde	8,0	> Zero	2155,00	****
Técnico em Ciências Agrárias	Melão maio	16,0	> Zero	6867,00	****
	Melão set.	11,4	> Zero	6867,00	****
	Milho verde	16,0	> Zero	2155,00	****
Empresarial	Melão maio	80,0	> Zero	6867,00	****
	Melão set.	64,4	> Zero	6867,00	****
	Milho verde	80,0	> Zero	2155,00	****

(****) Infinito

Quadro 7. Análise de sensibilidade do recurso terra para áreas de pequenos produtores

Mês	Área Ocupada (ha)	Quantidade de Folga (ha)	Preço-Sombra (R\$/ha)	Área Mínima (ha)	Área Máxima (ha)
Janeiro	0,0	8,0	0,00	0,0	****
Fevereiro	8,0	0,0	2155,00	8,0	****
Março	8,0	0,0	2155,00	8,0	****
Abril	8,0	0,0	2155,00	8,0	****
Maio	8,0	0,0	6867,00	8,0	****
Junho	8,0	0,0	6867,00	8,0	****
Julho	8,0	0,0	6867,00	8,0	****
Agosto	0,0	8,0	0,00	0,0	****
Setembro	5,7	2,3	0,00	5,7	****
Outubro	5,7	2,3	0,00	5,7	****
Novembro	5,7	2,3	0,00	5,7	****
Dezembro	0,0	8,0	0,00	0,0	****

(****) Infinito

Os resultados da análise de sensibilidade do recurso terra são apresentados no Quadro 7. Na segunda coluna (área ocupada) está relacionada a quantidade de recurso associada a cada restrição, utilizada pelas variáveis do modelo. Na terceira coluna (quantidade de folga), corresponde a quantidade de recurso não utilizada pelas atividades. A quarta coluna (preço-

sombra) relaciona os preços-sombra dos recursos escassos, ou seja, aqueles com folga igual a zero. Na quinta e sexta colunas, discriminam-se os valores mínimos e máximos que podem ser utilizados pelas restrições, sem que a solução básica seja alterada.

Os resultados demonstram que nos meses de fevereiro a julho, toda a área agrícola disponível foi totalmente ocupada para todos os tipos de lotes. Em vista da ausência de folga no recurso, tem-se um preço-sombra, o qual corresponde a R\$ 2.155,00/ha para os meses de fevereiro, março e abril (cultura do milho-verde), e R\$ 6.867,00 para os meses de maio, junho e julho (cultura do melão). Tais valores correspondem ao máximo valor para aquisição de uma unidade do referido recurso nos respectivos meses. Nos demais meses do ano, no entanto, as áreas ocupadas não atingiram o valor da área total disponível, apresentando folga, e conseqüentemente com preço-sombra igual a zero, caracterizando o recurso terra como não restritivo nesses meses.

No Quadro 8 estão relacionados os volumes de água mensais utilizados pelas atividades, considerando uma disponibilidade mensal máxima de 20.534,00m³, de 41.068,00m³ e de 232.128,00m³, para respectivas áreas de pequenos produtores, de técnicos em ciências agrárias e de empresariais. O fator de produção água foi restritivo ou limitante à produção das culturas no mês de outubro. Verifica-se que o preço-sombra é de R\$19,00/10m³, sendo este o máximo valor que se dispõe a pagar para aquisição de 10 m³ do referido recurso.

A título de ilustração, para o mês de outubro, em áreas de pequenos produtores, um volume de água que seja superior a 28.855,0m³, mantém a solução ótima atual e o preço-sombra diferente de zero. O mês de outubro se caracterizou como o de maior consumo, proporcionando assim o maior valor dentre os limites inferiores.

Quadro 8. Análise de sensibilidade do volume de água mensal para áreas de pequenos produtores

Mês	Estado	Volume Disponível (m ³)	Volume Utilizado (m ³)	Folga (m ³)	Preço-Sombra (R\$/10m ³)	Volume Mínimo (m ³)	Volume Máximo (m ³)
Jan.	Não limitante	20534	0,0	20534,0	0,00	0,0	****
Fev.	Não limitante	20534	0,0	20534,0	0,00	0,0	****
Mar.	Não limitante	20534	0,0	20534,0	0,00	0,0	****
Abr.	Não limitante	20534	0,0	20534,0	0,00	0,0	****
Mai.	Não limitante	20534	0,0	20534,0	0,00	0,0	****
Jun.	Não limitante	20534	15000,0	5534,0	0,00	15000,0	****
Jul.	Não limitante	20534	12080,0	8454,0	0,00	12080,0	****
Ago.	Não limitante	20534	0,0	20534,0	0,00	0,0	****
Set.	Não limitante	20534	11155,0	9379,0	0,00	11155,0	****
Out.	Limitante	20534	28855,0	0,0	19,00	28855,0	****
Nov.	Não limitante	20534	11587,0	8947,0	0,00	11587,0	****
Dez.	Não limitante	20534	0,0	20534,0	0,00	0,0	****

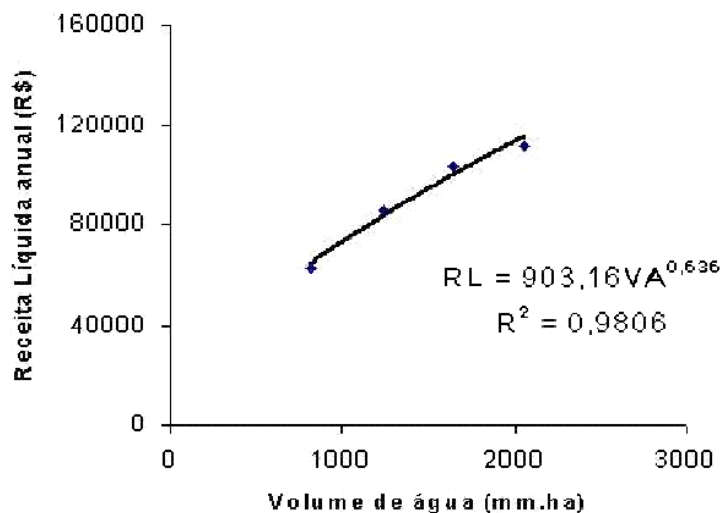
Os dados constantes no Quadro 9 da solução ótima do modelo para os quatro níveis de disponibilidade de água analisados, demonstram que mesmo ocorrendo uma redução na área total cultivada à medida que se reduz a disponibilidade de água, as culturas inicialmente recomendadas para a condição de não redução na oferta de água, permanecem na base, como decorrência do elevado valor da função-objetivo da cultura do melão comparativamente às demais culturas analisadas. Analisaram-se os níveis de disponibilidade de água correspondentes à redução de 20, 40 e 60% da oferta de água do distrito de irrigação.

Quadro 9. Solução ótima do modelo para quatro níveis de disponibilidade de água para áreas de pequenos produtores

Culturas	Disponibilidade de água mensal (mm.ha)			
	2053,4	1642,7	1232,0	821,4
Meloeiro maio	8,0	8,0	6,6	4,4
Meloeiro setembro	5,7	4,5	3,4	2,3
Milho Verde	8,0	8,0	8,0	8,0
Receita Líquida (R\$)	111.278,00	103.458,00	85.822,00	62.965,00
Redução na R.L. (R\$)		7.820,00	17.636,00	22.857,00

Ao reduzir-se em 60% o nível de disponibilidade de água do distrito de irrigação, a área anual cultivada apresenta uma redução da ordem de 32,5%, acarretando um decréscimo na renda líquida do produtor de 43,4%. A taxa de acréscimo na renda líquida do produtor diminui à medida que aumenta a disponibilidade mensal de água, conforme ilustra a Figura 1.

O recurso água já passa a ser restritivo também no mês de junho quando se reduz em 40% o nível de disponibilidade de água inicialmente alocado para o distrito de irrigação. Nessa condição, o preço-sombra do referido recurso é de R\$36,6/10 m³ para o mês de junho, valor esse superior em 92,6% ao preço-sombra do recurso água para o mês de outubro na condição de plena disponibilidade de água. Referido valor do preço-sombra sugere uma maior atratividade econômica do recurso água quando se tem uma redução no nível inicial do recurso, porquanto representa o incremento na receita líquida para cada unidade utilizada a mais do referido recurso.

**Figura 1.** Receita líquida anual do pequeno produtor em função do volume mensal de água disponível.

Utilizando modelos de programação linear para fins de otimização dos planos de cultivo nos Distritos de Irrigação Senador Nilo Coelho e Morada Nova, Dantas Neto (1994) e Rodrigues (2000), respectivamente, obtiveram resultados semelhantes, constatando redução na receita líquida com o decréscimo na disponibilidade de água. Constataram ainda, uma redução na eficiência econômica da água com o aumento da oferta de água.

Os dados constantes do Quadro 10 demonstram uma redução na ocupação média mensal na área agrícola cultivada, como uma decorrência do decréscimo na disponibilidade de água mensal. Não houve variação na área mensal cultivada com o milho verde em nenhuma das restrições e do meloeiro cultivado no mês de maio não houve variação para condição de 80% do

volume de água disponível (80%VAD), já o meloeiro cultivado no mês de setembro teve variação em todos os níveis de disponibilidade de água.

Quadro 10. Ocupação mensal da terra (ha) para quatro níveis de disponibilidade de água, em áreas de pequenos produtores

Mês	Disponibilidade de água mensal (mm.ha)			
	2053,4	1642,7	1232,0	821,4
Janeiro	0,0	0,0	0,0	0,0
Fevereiro	8,0	8,0	8,0	8,0
Março	8,0	8,0	8,0	8,0
Abril	8,0	8,0	8,0	8,0
Mai	8,0	8,0	6,6	4,4
Junho	8,0	8,0	6,6	4,4
Julho	8,0	8,0	6,6	4,4
Agosto	0,0	0,0	0,0	0,0
Setembro	5,7	4,5	3,4	2,3
Outubro	5,7	4,5	3,4	2,3
Novembro	5,7	4,5	3,4	2,3
Dezembro	0,0	0,0	0,0	0,0
Média mensal	5,4	5,1	4,5	3,7

Os dados constantes do Quadro 11 demonstram que o consumo de água foi limitante no mês de outubro, porquanto apresenta folga zero, considerando-se a vazão disponível para as três categorias de áreas analisadas. Na análise de redução dos níveis de disponibilidade de água, verifica-se que no mês de junho tal fator já se constitui em limitante, em razão do pico de consumo de água na cultura do meloeiro.

Segundo Arce (1990), uma vez que o modelo foi resolvido, situações que requerem computação adicional podem ocorrer, já que freqüentemente se está interessado em saber o que acontecerá com a solução, se alguns parâmetros, tais como os custos e os recursos mudarem. Dantas Neto (1994) e Rodrigues (2000), observaram o comportamento das variáveis, as mudanças dos limites especificados nas restrições, em que ocorresse mudança na solução ótima original do problema.

Quadro 11. Consumo de água mensal para quatro níveis de disponibilidade em áreas de pequenos produtores

Mês	Disponibilidade de água mensal (mm.ha)			
	2053,4	1642,7	1232,0	821,4
Janeiro	0,0	0,0	0,0	0,0
Fevereiro	0,0	0,0	0,0	0,0
Março	0,0	0,0	0,0	0,0
Abril	0,0	0,0	0,0	0,0
Mai	0,0	0,0	0,0	0,0
Junho	1500,0	1500,0	1232,0	821,4
Julho	1208,0	1208,0	992,2	661,5
Agosto	0,0	0,0	0,0	0,0
Setembro	1115,5	892,4	669,3	446,2
Outubro	2053,4	1642,7	1232,0	821,4
Novembro	1158,7	929,9	693,4	463,5
Dezembro	0,0	0,0	0,0	0,0

A análise de sensibilidade foi realizada considerando quatro níveis de disponibilidade de água para os três tipos de áreas analisadas, correspondentes à condição de vazão de projeto e redução nos níveis de vazão de 20, 40 e 60% da dotação prevista.

No Quadro 12 verifica-se que em razão do decréscimo na disponibilidade de água, ocorrem mudanças nos níveis das variáveis básicas constituídas por melão cultivado nos meses de maio e setembro. No entanto, a área recomendada para o cultivo do milho verde não sofre nenhuma alteração nos diversos níveis de disponibilidade de água analisados, em razão de não necessitar de irrigação suplementar durante o ciclo de cultivo.

A análise baseada na redução dos níveis de disponibilidade de água, decorrente da redução de vazão aos níveis de 20, 40 e 60% da vazão específica de projeto, acarretaria uma redução na receita líquida anual de respectivamente 7,0% 22,9% e 43,4% em relação a receita líquida anual para a condição de não restrição na vazão de projeto em áreas de pequenos produtores e de técnicos em ciências agrárias. Nas áreas empresariais, referido decréscimo seria um pouco menor como decorrência da maior vazão específica disponível nessas áreas.

Quadro 12. Análise de sensibilidade da receita líquida das variáveis básicas para quatro níveis de disponibilidade de água (mm.ha) em áreas de pequenos produtores

2053,4mm.ha				
Variável	Valor da Variável (ha)	Receita Líquida (R\$.ha ⁻¹)		
		Mínimo	Atual	Máximo
Melão maio	8,0	0,00	6.867,00	
Melão set.	5,7	0,00	6.867,00	****
Milho verde	8,0	0,00	2.155,00	****
1642,7mm.ha				
Variável	Valor da Variável (ha)	Receita Líquida (R\$.ha ⁻¹)		
		Mínimo	Atual	Máximo
Melão maio	8,0	0,00	6.867,00	****
Melão set.	4,5	0,00	6.867,00	****
Milho verde	8,0	0,00	2.155,00	****
1232,0mm.ha				
Variável	Valor da Variável (ha)	Receita Líquida (R\$.ha ⁻¹)		
		Mínimo	Atual	Máximo
Melão maio	6,6	0,00	6.867,00	****
Melão set.	3,4	1.996,00	6.867,00	****
Milho verde	8,0	604,00	2.155,00	****
821,4mm.ha				
Variável	Valor da Variável (há)	Receita Líquida (R\$.ha ⁻¹)		
		Mínimo	Atual	Máximo
Melão maio	4,4	0,00	6.867,00	****
Melão set.	2,3	1.996,00	6.867,00	****
Milho verde	8,0	604,00	2.155,00	****

6 CONCLUSÕES

Tomando-se por base as culturas consideradas, as restrições de área, água e mercado, os preços dos produtos e custos de produção, os resultados do estudo permitiram obter as seguintes conclusões:

A disponibilidade de água prevista para o Distrito de Irrigação Baixo Acaraú para áreas de pequenos produtores, de técnicos em ciências agrárias e empresariais, se mostrou limitante

no mês de outubro quanto ao uso total do recurso terra, ao considerar-se o estabelecimento das culturas propostas no plano que apresentou a melhor alternativa econômica. Na análise de restrição de água, tal fator apresentou-se também como restritivo no mês de junho, considerando-se uma redução de 40% da disponibilidade de água do Distrito de Irrigação;

A combinação de cultivo constituída por meloeiro no mês de maio, meloeiro no mês de setembro e milho verde foi a que apresentou maior nível de receita líquida para áreas de pequenos produtores, de técnicos em ciências agrárias e empresariais, correspondendo a R\$13.909,00/ha/ano para pequenos produtores e técnicos em ciências agrárias e R\$14.547,00 para empresários. A área de plantio para o cultivo de melão no mês de maio e de milho verde, corresponde ao total da área disponível. Já o cultivo de melão no mês de setembro utiliza 71,2% da área disponível para pequenos produtores e técnicos em ciências agrárias e 80,5% para áreas empresariais;

A análise de sensibilidade do recurso terra do plano ótimo de cultivo, apresentou preço-sombra diferente de zero no período de fevereiro a julho, indicando que esse recurso foi restritivo. No período de maio a julho, que corresponde ao período de cultivo do melão, o hectare de terra atingiu o valor máximo de R\$6867,00.

A análise considerando os quatro níveis de disponibilidade de água demonstrou que as receitas líquidas aumentaram com o aumento da disponibilidade de água, todavia, o incremento da receita líquida diminuiu à medida que aumentou o recurso água.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARCE, R. A. B. **Otimização de um projeto hidroagrícola, no município de Guaira (SP), utilizando programação linear.** 1990. 76f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1990.

BREGALDA, P. F.; OLIVEIRA, A. A. F. de.; BORNSTEIN, C. T. **Introdução à programação linear.** 3.ed. Rio de Janeiro: Editora Campus, 1981. 329/p.

DANTAS NETO, J. **Modelos de decisão para otimização do padrão de cultivo, em áreas irrigadas, baseadas nas funções de respostas das culturas à água.** 1994. 125f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 1994.

FRIZZONE, J. A. Programação matemática aplicada á projetos hidroagrícolas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 24., 1995, Viçosa. **Anais...** Viçosa: Universidade Federal de Viçosa/Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1995. p.29.

FRIZZONE, J. A. **Modelo de programação linear para otimizar o uso da água em Perímetros Irrigados e sua aplicação no Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho.** 1996. 57f. Tese (Livre Docente) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1996.

HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. **Introdução à pesquisa operacional.** São Paulo: EDUSP. 1988. 850/p.

LINDO SYSTEMS INCORPORATION. **Lindo user's manual.** Illinois; 1996. 390/p.

RODRIGUES, J. A. L. **Plano ótimo de cultivo no projeto de irrigação Morada Nova, Ceará, utilizando modelo de programação linear.** 2000. 81f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2000.

VELEZ, H. P. Introducción a la teoría de la operación de distritos y sistemas de riego. Chapingo: Escuela Nacional de Agricultura, 1977. 472/p.