

PLANO ÓTIMO DE CULTIVO NO PROJETO DE IRRIGAÇÃO MORADA NOVA, CEARÁ, UTILIZANDO MODELO DE PROGRAMAÇÃO LINEAR

José Aurélio Lucena Rodrigues

Departamento Nacional de Obras Contra as Secas – Av. Duque de Caxias.

CEP 60000-000 – Fortaleza-CE

Raimundo Nonato Távora Costa

Universidade Federal do Ceará – Departamento de Engenharia Agrícola. Campus do Pici. Bloco 804.

CEP 60455-760 – Fortaleza-CE

José Antônio Frizzone

Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz – Departamento de Engenharia Rural, Av. Pádua

Dias, 11 – Caixa Postal 11. 13418-900 – Piracicaba-SP

José Vanglésio de Aguiar

Universidade Federal do Ceará – Departamento de Engenharia Agrícola. Campus do Pici. Bloco 804.

CEP 60455-760 – Fortaleza-CE

1 RESUMO

O objetivo do trabalho foi desenvolver um modelo de programação linear para quantificar as variáveis do processo de produção, que otimizem a operação do Projeto de Irrigação Morada Nova (PIMN). O modelo procura estabelecer um plano ótimo de cultivo, objetivando a maximização da sua receita líquida anual. Na análise do modelo foram incorporadas as restrições de volume de água mensal, volume de água anual, terra, mercado. Com base nas culturas estudadas, nas restrições de área cultivada, nos preços e nos custos de produção, os resultados permitiram as seguintes conclusões: 1) o modelo de programação linear recomendou os cultivos de 1050 ha de arroz semeado em fevereiro, 1050 ha de arroz semeado em agosto, 750 ha de feijão semeado em julho, 130 ha de milho (espiga) semeado em janeiro, 155 ha de banana e 112 ha de coco para um volume de água utilizado de 30.285.5460 m³; 2) modelo de otimização desenvolvido projetou uma receita líquida 19,06 % maior que a obtida com o plano de cultivo do PIMN e um volume anual utilizado inferior em 47,3 %, considerando o ano agrícola de 1997; 3) a ocupação da terra foi baixa, com percentuais médios anuais de 41,4% e 40,3% respectivamente, para o modelo proposto e o plano de cultivo do PIMN; 4) a análise de sensibilidade do recurso terra apresentou preço sombra zero, indicando que esse recurso não foi restritivo; 5) mantendo-se o volume mensal disponível em 7.516.400 m³ e 9.730.700 m³ respectivamente, para os períodos de janeiro a junho e julho a dezembro, volumes anuais superiores a 30.285.560 m³ não contribuíram para o aumento da receita líquida do PIMN.

UNITERMOS: Programação linear, padrão de cultivo, irrigação.

RODRIGUES, J. A. L., COSTA, R. N. T., FRIZZONE, J. A., AGUIAR, J. V.
**OPTIMAL CROPPING PATTERN IN THE “MORADA NOVA” IRRIGATION PROJECT
USING LINEAR PROGRAMMING MODEL**

2 ABSTRACT

The main objective of this work was to develop a linear programming model, in order to quantify the process variables which optimize the irrigation project operation. The model establishes optimal cropping pattern in the irrigation project “Morada Nova” (MNIP), aiming to maximize the net annual income. Restrictions to the model were monthly water supply, annual water supply, land and market system. Based on the water-yield considered, cultivated land restrictions, production cost and

product prices, the following conclusions were reached: 1) the model resulted a optimal cropping pattern comprising 1050 ha of rice cultivated in February, 1050 ha of rice cultivated in August, 750 ha of beans (vigna) cultivated in July, 130 ha of corn (cob) cultivated in January, 155 ha of banana and 112 ha of cocunut, for a total annual utilized water of 30.285.560 m³; 2) the optimization model presented, estimated a net income of 19,06 % higher than cropping pattern used in the MNIP, using an annual water volume 47,3 % lower, considering the agricultural year of 1997; 3) the land occupation was low with annual average percentages of 41,4% e 40,3% respectively, to the presented model and the cropping pattern used in the MNIP; 4) the sensibility analysis to the land resource revealed dual price zero, indicating that this recourse was not restrictive; 5) maintaining the total monthly availability of 7.516.400 m³ and 9.730.700 m³ respectively, in the periods from January until June and from July until December respectively, annual volumes higher than 30.285.560 m³, did not increase the return of the MNIP.

KEYWORDS: Linear programming, cropping pattern, irrigation.

3 INTRODUÇÃO

A programação linear é apropriada para problemas complexos de alocação, que não podem ser resolvidos satisfatoriamente com técnicas analíticas convencionais (Hillier & Lieberman, 1988; Bernardo et. al., 1988). É definida como uma técnica utilizada para resolver determinada classe de problemas em que se procura alocar recursos limitados a atividades ou decisões diversas, de maneira ótima. O objetivo é maximizar algum índice de performance, como o lucro ou minimizar alguma medida de custo.

Nas bacias hidrográficas do semi-árido do Nordeste brasileiro, onde o recurso hídrico é escasso, 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 uso dessa água deverá enfocar sua alocação entre as necessidades de consumo de diversas culturas, e a produção fica determinada pelo grau com que se pode atender às necessidades hídricas totais mediante o suprimento de água disponível (Frizzone, 1996).

A programação linear é utilizada em numerosos campos sendo bastante útil às instituições que prestam assistência técnica ao produtor rural. Conforme Mainié (1969), a aceleração das técnicas agropecuárias tornam mais complexas as tomadas de decisões dos agropecuaristas, de maneira que as técnicas de programação linear podem auxiliar nas tomadas de decisões.

O desenvolvimento de modelos matemáticos para gerar programas de otimização para a irrigação tem recebido a atenção de muitos pesquisadores (Wu & Liang, 1972; Huang et al., 1975; Tsakiris & Kiountouzis, 1982).

Conforme Trava et al. (1977), duas técnicas de programação são comumente, usadas: a dinâmica e a linear. Modelos de programação dinâmica são utilizados, em geral, para pequenos problemas de planejamento, devido às dificuldades computacionais inerentes à solução do modelo (Yaron & Bressler, 1983). Para problemas maiores, tem-se utilizado técnicas de programação linear (Huang et al., 1975; Trava et al., 1977; Matanga & Mariño, 1979; Tsai et al., 1987; Boman et al., 1989; Mannoichi & Mecarelli, 1994; Frizzone et al., 1994). Para Benedini (1988), a programação linear é o procedimento de otimização mais extensamente utilizado para resolver problemas complexos de recursos d'água.

Os modelos de programação linear aplicados em planejamento de irrigação são freqüentemente formulados estabelecendo como função objetivo a maximização da renda líquida anual, sujeito às restrições de disponibilidade de água e outros recursos. Devida a consideração de escassez do recurso hídrico, a maioria dos modelos foram desenvolvidos no sentido de selecionar cultivos e respectivas áreas, para serem explorados em condições limitantes de água.

Matanga & Mariño (1979) otimizaram a irrigação de três culturas, em Davis, Califórnia, em termos de alocação de área e para tanto utilizaram um modelo de programação linear para maximizar a receita líquida, considerando-se a disponibilidade de água, a mão-de-obra, o custo da irrigação e os custos da água e dos produtos.

Bernardo et al. (1988) desenvolveram numa área irrigada por superfície, localizada em Washington State's Columbia River Basin, um modelo baseado em simulação e programação linear para otimizar a alocação intrazonal de água de irrigação, sob condições limitadas de disponibilidade.

Arce (1990) determinou através da programação linear a otimização de um projeto hidroagrícola, no município de Guaíra, São Paulo, combinando culturas irrigadas, tendo como restrições terra, água e mercado.

Buller et al. (1991) usaram um modelo de programação linear para estimar a melhor combinação na produção de três culturas irrigadas (milho, trigo e sorgo granífero) no oeste de Kansas. O modelo relaciona a influência das condições hidrológicas, solo e relação entre culturas, os custos e os retornos para uma tomada de decisão econômica.

Dantas Neto (1994) desenvolveu dois sistemas de equações matemáticas baseados na função de resposta das culturas à água e adaptou-os a modelos de programação linear, objetivando quantificar as atividades do processo de produção, que otimizam a operação da área de colonização do Projeto de Irrigação Nilo Coelho Petrolina (PE) – Brasil. As restrições à função objetivo foram volume de água mensal, volume de água anual, terra e mercado.

Mainuddin et al. (1997) desenvolveram um modelo de programação linear com vários objetivos, maximização da renda líquida e maximização da área irrigada com intervalos de confiança de 80, 50 e 20%, para os recursos de chuva e do lençol freático.

O presente trabalho tem como objetivo desenvolver um modelo de programação linear para estabelecer um plano ótimo de cultivo no Projeto de Irrigação Morada Nova, utilizando como parâmetro determinante, a maximização da receita líquida anual. Na análise do modelo serão incorporadas as restrições de disponibilidade de água, terra e mercado.

4 MATERIAL E MÉTODOS

O Projeto de Irrigação Morada Nova (PIMN) está localizado nos municípios de Morada Nova e Limoeiro do Norte, Estado do Ceará, na micro - região do baixo Jaguaribe, sub - vale Banabuiu, à 170 Km de Fortaleza, com as seguintes coordenadas geográficas: 5° 06' de latitude sul, 38° 23' de longitude oeste, 80 m de altitude

O projeto está constituído de solos aluviais, predominando as texturas fina e média com relevo plano a suave ondulado (DNOCS, 1992). O clima dessa região, segundo a classificação de Köppen, corresponde a Bsw'h', muito quente e semi-árido e, tropical quente de seca acentuada, de acordo com Gaussen. A precipitação média anual é 872 mm; a estação chuvosa ocorre geralmente de janeiro a junho, concentrando 72 % nos meses de fevereiro a maio, no entanto, a distribuição é bastante irregular, podendo qualquer mês do ano ocorrer veranico. Os recursos hídricos destinados ao projeto provêm do sistema açude público Arrojado Lisboa, capacidade de acumulação de 1,7 x 10⁹ m³ e do açude público Pedras Brancas, capacidade de acumulação de 4,3 x 10⁸ m³, localizados à montante do projeto.

O modelo esquematizado neste estudo foi baseado nos dados oriundos dos relatórios da Administração Central e da 2ª Diretoria Regional do DNOCS, referentes ao ano de 1997. Consiste de uma função objetivo, sujeita as restrições no uso dos recursos (terra, água, mercado) tendo como objetivo a maximização da receita líquida anual. O modelo é representado pelas seguintes equações:

$$MAX \quad RL = \sum_{i=1}^n P_i Y_i X_i - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m A_{ij} C_{ij} X_i - \sum_{i=1}^n \sum_{h=1}^{12} CT (W_{ih}/E) X_i \quad (1)$$

tendo como restrições:

$$\sum_{i=1}^n (W_{ih} / E) X_i \leq VM_h \quad (i = 1 \dots, n; \quad h = 1 \dots, 12) \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m A_{ij} X_i \leq D_j \quad (i = 1 \dots, n; \quad j = 1 \dots, m) \quad (3)$$

$$X_i \geq 0 \quad (4)$$

sendo:

- RL receita líquida total do projeto (R\$);
i número inteiro representando a cultura (i = 1...n);
j número inteiro representando outros insumos (j = 1...m);
h número inteiro representando o mês do ano (h = 1...12);
P_i preço unitário do produto da i-ésima cultura (R\$/kg);
X_i área cultivada com i-ésima cultura (ha);
Y_i produtividade obtida da i-ésima cultura (kg/ha);
A_{ij} quantidade demandada do insumo j pela cultura i (kg/ha);
C_{ij} custo unitário do insumo j pela cultura i (R\$/kg);
CT custo unitário da tarifa de água (R\$/mm.ha);
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;
VT volume anual de água disponível;
D_j disponibilidade máxima do insumo j.

Foram consideradas sete culturas, as quais ocuparam 88 % da área irrigada em operação no Projeto de Irrigação Morada Nova, ano de 1997. O plano de ocupação mensal das áreas encontra-se na Tabela 1.

Tabela 1 - Plano de ocupação mensal das culturas da área do PIMN. Ano 1997.

CULTURAS	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Arroz (2)		xx	xx	xx	xx	xx						
Arroz (8)								xx	xx	xx	xx	xx
Feijão vigna (7)							xx	xx	xx			
Feijão vigna (9)									xx	xx	xx	
Milho espiga (1)	xx	xx	xx									
Banana	xx											
Laranja	xx											
Acerola	xx											
Coco	xx											

Arroz (2): cultivado em fevereiro
Arroz (8): cultivado em agosto
Milho (1): cultivado em janeiro

Feijão vigna (7): cultivado em julho
Feijão vigna (9): cultivado em setembro

O custo de produção das culturas anuais, a amortização dos investimentos das culturas perenes e o custo de manutenção das culturas permanentes foram elaborados observando-se os indicadores tecnológicos recomendados pelo DNOCS (1996) com os preços atualizados para fevereiro de 1998 (Suma econômica, 1998).

O cálculo da amortização dos investimentos foi feita como se segue:

$$A = I_0 \times FRC \quad (5)$$

$$FRC = \frac{(1+i)^n}{(1+i)-1} \quad (6)$$

sendo:

- A amortização do investimento;
 I₀ investimento inicial
 FRC fator de recuperação do capital;
 i taxa real (decimal) anual de juros (0,12);
 n número de anos

As necessidades mensais de água dos cultivos basearam-se nos seguintes fatores:

- Evapotranspiração de referência (ET_o) - as estimativas da evapotranspiração de referência foram obtidos de Castro (1997), as quais foram calculados pelo método de Penman-Monteith;
- Coeficientes das culturas (K_c) – para cada estágio de desenvolvimento das culturas de arroz, feijão, milho, banana e laranja foram obtidos da publicação de Doorenbos & Kassan (1994). O coeficiente da cultura do coco conforme Ferreira et al. (1998) e o da acerola de acordo com Rosa Júnior et al. (1994);
- Evapotranspiração máxima (E_{tm}) obtida através da expressão: E_{tm} = ET_o x K_c;
- Necessidade de Irrigação (NI) calculada através da expressão: NI = E_{tm} – precipitação efetiva;
- Precipitação efetiva - obtida conforme Mendes (1997);
- Requerimento mensal de irrigação ou lâmina bruta (L_b) - calculada através da expressão: L_b = NI/E;
- Eficiência de aplicação d'água (E) - obtida de acordo com a metodologia de balanço de volume (Castro, 1997).

Os coeficientes de requerimento mensal de irrigação encontram-se na Tabela 2.

Tabela 2 – Coeficientes de requerimento mensal de água (mm) das culturas estudadas.

Meses	Arroz	Feijão	Feijão	Milho	Banana	Coco	Laranja	Acerola
Jan				69,0	171,7	94,7	107,5	69,0
Fev	89,7			69,1	69,0	6,9	17,3	-
Mar	-			-	-	-	-	-
Abr	-				-	-	-	-
Mai	60,6				82,9	15,9	27,1	-
Jun	122,9				145,1	78,5	89,6	56,3
Jul		117,1			231,1	155,1	167,8	129,8
Ago	339,4	295,0			309,8	220,9	235,7	191,2
Set	393,7	284,0	190,2		331,1	237,2	252,8	205,9
Out	345,4		329,4		345,4	249,5	265,4	217,5
Nov	288,2		273,5		317,8	229,2	243,9	199,6
Dez	238,2				266,1	182,4	196,3	154,5

Os dados para determinar os coeficientes técnicos das culturas foram obtidos dos relatórios do Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS, 1996 e 1997), com os preços atualizados para fevereiro de 1998 (Suma Econômica, 1998), conforme mostra a Tabela 3.

Tabela 3 – Coeficientes técnicos das culturas

Cultura	Custo produção ⁽¹⁾ (R\$.ha ⁻¹)	Produtividade (kg.ha ⁻¹)	Preço venda ⁽³⁾ (R\$.kg ⁻¹)	Lâmina bruta ⁽⁴⁾ (mm)	Renda líquida (R\$.ha ⁻¹)
Arroz (2)	1.213,00	5800	0,27	273,2	322,00
Arroz (8)	1.362,00	6200	0,28	1604,9	191,00
Feijão (7)	691,00	1120	0,84	696,1	170,00
Feijão (9)	691,00	1120	0,84	793,1	159,00
Milho (1)	954,00	5000	0,30	138,1	530,00
Banana	2.231,00 ⁽²⁾	15000	0,25	2270,0	1.260,0 0
Coco	894,00 ⁽²⁾	7200	0,26	1470,3	810,00
Laranja	1.316,00 ⁽²⁾	8000	0,28	1603,4	741,00
Acerola	1.698,00 ⁽²⁾	4200	0,59	1223,8	640,00

⁽¹⁾ sem o custo da tarifa d'água

⁽²⁾ amortização do investimento acrescido da manutenção das culturas permanentes

⁽³⁾ Fonte: SIGMAN e CIVAB

⁽⁴⁾ preço da água, R\$.m⁻³: 0,0114

O modelo de programação matemática utilizado neste trabalho consiste em uma função objetivo, sujeita as restrições quanto a disponibilidade de água, terra e mercado. O objetivo foi obter um padrão ótimo de cultivos irrigados, compatível com as características de exploração da área, de forma a maximizar a soma dos benefícios líquidos decorrentes da produção das culturas. O modelo estudado é representado pela seguinte função objetivo:

$$\text{MAX RL} = (322 A_2 + 191A_8 + 170 F_7 + 159 F_9 + 530 M_1 + 1260 B + 810 C + 741 L + 640 AC + (0JAN + 0FEV + 0MAR + 0ABRI + 0 MAI + 0JUN + 0JUL + 0AGO+ 0SET + 0OUT + 0NOV + 0DEZ) \quad (7)$$

sendo:

MAX RL maximização da receita líquida

A₂,A₈ áreas cultivadas com arroz em fevereiro e agosto, respectivamente (ha).

F₇,F₉ áreas cultivadas com feijão em julho e setembro, respectivamente (ha).

M₁ área cultivada com milho em janeiro.

B área cultivada com banana.

C área cultivada com coco.

L área cultivada com laranja.

AC área cultivada com acerola.

JAN, FEV, MAR, DEZ correspondem as áreas cultivadas sob irrigação nos meses de janeiro, fevereiro, marçodezembro, respectivamente.

O modelo está sujeito às restrições de:

A) ÁREA

$$\text{AJAN} \quad M_1 + B + L + AC + C \leq 3290 \quad (8)$$

AFEV	$A_2 + M_1 + B + L + AC + C \leq 3290$	(9)
AMAR	$A_2 + M_1 + B + L + AC + C \leq 3290$	(10)
AABR	$A_2 + B + L + AC + C \leq 3290$	(11)
AMAI	$A_2 + B + L + AC + C \leq 3290$	(12)
AJUN	$A_2 + B + L + AC + C \leq 3290$	(13)
AJUL	$F_7 + B + L + AC + C \leq 3290$	(14)
AAGO	$A_8 + F_7 + B + L + AC + C \leq 3290$	(15)
ASET	$A_8 + F_7 + F_9 + B + L + AC + C \leq 3290$	(16)
AOUT	$A_8 + F_9 + B + L + AC + C \leq 3290$	(17)
ANOV	$A_8 + F_9 + B + L + AC + C \leq 3290$	(18)
ADEZ	$A_8 + B + L + AC + C \leq 3290$	(19)
BJAN	$M_1 + B + L + AC + C - JAN = 0$	(20)
BFEV	$A_2 + M_1 + B + L + AC + C - FEV = 0$	(21)
BMAR	$A_2 + M_1 + B + L + AC + C - MAR = 0$	(22)
BABR	$A_2 + B + L + AC + C - ABR = 0$	(23)
BMAI	$A_2 + B + L + AC + C - MAI = 0$	(24)
BJUN	$A_2 + B + L + AC + C - JUN = 0$	(25)
BJUL	$F_7 + B + L + AC + C - JUL = 0$	(26)
BAGO	$A_8 + F_7 + B + L + AC + C - AGO = 0$	(27)
BSET	$A_8 + F_7 + F_9 + B + L + AC + C - SET = 0$	(28)
BOUT	$A_8 + F_9 + B + L + AC + C - OUT = 0$	(29)
BNOV	$A_8 + F_9 + B + L + AC + C - NOV = 0$	(30)
BDEZ	$A_8 + B + L + AC + C - DEZ = 0$	

sendo:

AJAN área irrigada no mês de janeiro
AFEV área irrigada em fevereiro

..

ADEZ área irrigada no mês de dezembro

BJAN, BFEV, BDEZ - balanço mensal de área em janeiro, fevereiro, dezembro. As áreas cultivadas em cada mês serão iguais as áreas irrigadas mensalmente.

As restrições de área de 8 a 19 resultantes da combinação das culturas nos 12 meses do ano determinam que a ocupação da área deva ser menor ou igual a área disponível. No presente trabalho, foram utilizados 3290 ha, que corresponde a 88% da área irrigável das culturas estudadas, ficando o restante da área para o centro técnico e as culturas forrageiras. As restrições de 20 a 30 não influenciam na solução do modelo, expressando apenas, as áreas alocadas aos diferentes meses do ano.

B) ÁGUA

$$VJAN \quad 69,0M_1 + 171,7B + 107,5L + 69,0AC + 94,7C \leq 751640 \quad (31)$$

$$VFEV \quad 89,7A_2 + 69,1M_1 + 69,0B + 17,3L + 0AC + 6,9C \leq 751640 \quad (32)$$

$$VMAR \quad 0A_2 + 0M_1 + 0B + 0L + 0AC + 0C \leq 751640 \quad (33)$$

$$VABR \quad 0A_2 + 0B + 0L + 0AC + 0C \leq 751640 \quad (34)$$

$$VMAI \quad 60,6A_2 + 82,9B + 27,1L + 0AC + 15,9C \leq 751640 \quad (35)$$

$$VJUN \quad 122,9A_2 + 145,1B + 89,6L + 56,3AC + 78,5C \leq 751640 \quad (36)$$

$$\begin{aligned} \text{VJUL} & 117,1F_7 + 231,1B + 167,8L + 129,8AC + 155,1C \leq 973070 & (37) \\ \text{VAGO} & 339,4A_8 + 295,0F_7 + 309,8B + 235,7L + 191,2AC + 220,9C \leq 973070 & (38) \\ \text{VSET} & 393,7A_8 + 284,0F_7 + 190,2F_9 + 331,1B + 252,8L + 205,9AC + 237,2C \leq 973070 & (39) \\ \text{VOUT} & 345,4A_8 + 329,4F_9 + 345,4B + 265,4L + 217,5AC + 249,5C \leq 973070 & (40) \\ \text{VNOV} & 288,2A_8 + 273,5F_9 + 317,8B + 243,9L + 199,6AC + 229,2C \leq 973070 & (41) \\ \text{VDEZ} & 238,2A_8 + 266,1B + 196,3L + 154,5AC + 182,4C \leq 973070 & (42) \\ \text{VTOTAL} & 273,2A_2 + 1604,9A_8 + 696,1F_7 + 793,1F_9 + 138,1M_1 + 2270,0B + 470,3C + \\ & + 1603,4L + 1223,8AC \leq \text{VANUAL} & (43) \end{aligned}$$

sendo:

VJAN, VFEV,, VDEZ – volume de água mensal, em mm.ha, disponível nos meses de janeiro, fevereiro,, dezembro.

VANUAL – Volume anual de água disponível, em mm.ha.

As restrições apresentadas nas equações (31) a (42) garantem que a demanda mensal de água das culturas não será maior que a disponível pelo PIMN durante cada mês. Nos períodos de janeiro a junho e julho a dezembro, considerou-se como derivação máxima respectivamente, 751.640 mm.ha (7.516.400 m³) e 973.070 mm.ha (9.730.700 m³), os quais foram os maiores volumes de água derivados à área irrigada dos colonos nesses períodos. Procedeu-se assim, porque a água derivada para o projeto, proveniente da calha do rio Banabuiu é dependente da estação chuvosa, que ocorre principalmente, no primeiro período (janeiro a junho); enquanto que no segundo período, estação seca (julho a dezembro), a água derivada para o projeto proveniente da calha do rio Banabuiu, depende das liberações dos açudes Arrojado Lisboa e Pedras Brancas.

A restrição da equação (43) assegura que a demanda total de água das culturas não será maior que a disponibilidade anual do PIMN. O volume anual de água disponível (VANUAL) em 1997 foi de 6.401.400 mm.ha.

C) PRODUÇÃO DAS CULTURAS

$$\text{MAXA}_2 \quad A_2 \leq 1050 \quad (44)$$

$$\text{MAXA}_8 \quad A_8 \leq 1050 \quad (45)$$

$$\text{MINTOTF} \quad F_7 + F_9 \geq 380 \quad (46)$$

$$\text{MAXTOTF} \quad F_7 + F_9 \leq 750 \quad (47)$$

$$\text{MAXB} \quad B \leq 155 \quad (48)$$

$$\text{MAXL} \quad L \leq 65 \quad (49)$$

$$\text{MAXCACL} \quad C + AC + L \leq 112 \quad (50)$$

As equações (44) a (50) representam as restrições à produção das culturas devido a vários fatores, tais como, mercado, demanda interna, problemas regionais e têm o seguinte significado:

MAXA₂ - área máxima a ser cultivada com arroz em ha, no mês de fevereiro. Causa da restrição: disponibilidade de solo

MAXA₈ - área máxima a ser cultivada com arroz em ha, no mês de agosto. Causa da restrição: disponibilidade de solo

- MAXM₁ - área máxima a ser cultivada com milho (espiga) em ha, no mês de janeiro. Causa da restrição: mercado.
- MINTOTF - área mínima a ser cultivada com feijão nos meses de julho e setembro. Causa da restrição: demanda interna
- MAXTOTF - área máxima a ser cultivada com feijão nos meses de julho e setembro. Causa da restrição: mercado.
- MAXB - área máxima a ser cultivada com banana. Causa da restrição: mercado.
- MAXL - área máxima a ser cultivada com laranja. Causa da restrição: resistência ao cultivo.
- MAXCACL - área máxima a ser cultivada com coco, acerola e laranja. Causa da restrição: aptidão de solo.

Para resolver o modelo formulado de programação linear com 30 variáveis e 55 restrições utilizou-se o software desenvolvido pelo Lindo Systems Inc., de nome Linear Interactive and Discrete Optimizer (LINDO), o qual tem como objetivo resolver sistemas de equações lineares, utilizando para isto o algoritmo iterativo “método simplex revisado”.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados são apresentados sob dois aspectos, visando atender os objetivos propostos. No primeiro caso, é feita uma análise comparativa dos resultados obtidos pelo modelo de programação linear estudado e o plano de cultivo do Projeto de Irrigação Morada Nova (PIMN), para um volume ofertado aos usuários de 64.014.400 m³ (6.401.400 mm.ha), conforme relatório de planejamento de operação e manutenção, ano agrícola de 1997, elaborado pelo DNOCS. No segundo caso, são analisados e discutidos os resultados do modelo de programação linear, obtidos a partir de uma simulação de três níveis de volume de água disponível: 1.280.000 mm.ha; 1.920.000 mm.ha e 2.560.000 mm.ha; correspondentes a 0,2; 0,3 e 0,4 do volume derivado para o Projeto de Irrigação Morada Nova no ano agrícola de 1997.

O volume anual de água ofertada aos usuários no ano de 1997 foi de 64.014.400 m³ e os volumes para os períodos de janeiro/junho e julho/dezembro foram respectivamente, 7.516.400 m³ e 9.730.700 m³, correspondentes aos maiores volumes ocorridos nesses períodos. Utilizando essas restrições de água e satisfazendo às exigências de áreas máximas e mínimas das culturas, o modelo proposto resultou no plano ótimo de cultivo apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 - Solução ótima encontrada pelo modelo de programação linear, para um volume anual de água disponível de 64.014.400 m³.

Cultura	Semeadura a (mês)	Lâmina de água (mm)	Coef.Téc. F.O ⁽¹⁾ R\$.ha ⁻¹	Área (ha)
Arroz	Fevereiro	273,2	322,00	105 0
Arroz	Agosto	1604,9	191,00	105 0
Feijão	Julho	696,1	170,00	750
Milho (espiga)	Janeiro	138,1	530,00	130
Banana	*	2270,0	1.260,00	155
Coco	*	1470,3	810,00	112
Receita líquida anual (R\$)			1.021.070,00	

(*) cultura perene

⁽¹⁾ coeficientes técnicos da função objetivo.

A cultura do arroz foi indicada para os meses de fevereiro e agosto, com lâmina total de água, respectivamente, 273,2 mm e 1604,9 mm e área de 1050 ha (para cada mês), definida pela restrição de

disponibilidade de solo. O feijão com restrição de área mínima de 380 ha, pela necessidade de atender a demanda interna e restrição de área máxima de 750 ha, devido a disponibilidade de mercado, só foi indicado para o mês de julho, com área de 750 ha e lâmina total de irrigação de 696,1 mm. A área de milho cultivada em janeiro e irrigada com 138,1 mm foi indicada no nível máximo da restrição (130 ha), proporcionada pela disponibilidade de mercado. O cultivo da banana, com restrição de área máxima, foi recomendada no limite máximo (155 ha) e com lâmina total de irrigação de 2270,0 mm. Os 112 ha de coco, indicados para cultivo, deverão ser irrigados com 1470,3 mm. Deve-se acrescentar que todas as culturas foram irrigadas sem déficit.

A Tabela 5 apresenta uma análise comparativa entre o modelo proposto e o plano de cultivo do PIMN no ano de 1997. Considerando-se a mesma produtividade para o modelo proposto e o plano de cultivo do PIMN, observa-se que o retorno financeiro do modelo (R\$ 1.021.070,00) é superior em 19,06 % ao plano de cultivo do PIMN (R\$ 857.603,00), mesmo com a área total de cultivo inferior em 1,3%. Essa maior rentabilidade do modelo é função da combinação de atividades, que apresentam uma alta receita marginal, como das culturas de banana, milho (espiga) e coqueiro.

A possibilidade de múltiplas combinações entre as atividades e o uso intenso da terra numa área irrigada, admite-se a terra restritiva por ser estática, no sentido de que sua disponibilidade, 3290 ha, não pode aumentar. No entanto, verifica-se nos planos apresentados, uma baixa intensidade de uso da terra (Tabela 6).

A área média mensal de acordo com o modelo estudado é de 1362 ha e para o plano de cultivo do PIMN é de 1327 ha, correspondendo, respectivamente a 41,4% e 40,3% da utilização total.

A maior ocupação da área conforme proposto no modelo, se verifica nos meses de agosto e setembro, período de cultivo do arroz, cultivado no mês de agosto. No plano de cultivo do PIMN, o período de agosto a novembro proporcionou uma maior ocupação da área, para os cultivos de arroz e feijão vigna, este semeado em setembro.

As culturas de arroz, feijão e milho vêm ocupando nos últimos dezesseis anos (1981/1996) cada vez mais a área do projeto de colonização, principalmente na década de 1990 quando a ocupação chega quase a 100%, como se pode observar na Figura 1.

Tabela 5 – Análise comparativa entre a solução ótima encontrada pelo modelo de programação linear e o plano de cultivo do PIMN, para um volume anual de água disponível de 64.014.400 m³.

Cultura	Semeadura (mês)	Modelo Proposto (ha)	Plano de Cultivo PIMN (ha)
Arroz	Fevereiro	1050	1272
Arroz	Agosto	1050	1464
Feijão	Julho	750	149
Feijão	Setembro	0	308
Milho (espiga)	Janeiro	130	32
Banana	*	155	56
Coco	*	112	3
Laranja	*	0	3
Acerola	*	0	3
Área Total (ha)		3247	3290
Receita Líquida (R\$)			1.021.070,00
			857.603,00

(*) cultura perene

A falta de opções para outras culturas devido principalmente, a ineficiência de uma infraestrutura de comercialização de produtos perecíveis, ausência de agroindústrias de processamento,

somadas às restrições existentes na utilização das áreas, exprimem a baixa ocupação do PIMN. Dantas Neto (1994) constatou também uma baixa intensidade do uso da terra no planejamento da irrigação do Projeto Senador Nilo Coelho, Petrolina-PE, através de modelos de programação linear, ocasionada, no entanto, pela indisponibilidade de água para o atendimento da demanda no ano agrícola de 1992.

Tabela 6 - Área ocupada (ha) por mês referente ao modelo estudado e o plano de cultivo do PIMN, a considerando a quantidade de água utilizada durante o ano de 1997 (64.014.000 m³).

Meses	Modelo Estudado		Plano de Cultivo do PIMN	
	Área (ha)	Ocupação (%)	Área (ha)	Ocupação (%)
Janeiro	397	12,07	97	2,95
Fevereiro	1447	43,98	1369	41,61
Março	1447	43,98	1369	41,61
Abril	1317	40,03	1337	40,64
Mai	1317	40,03	1337	40,64
Junho	1317	40,03	1337	40,64
Julho	1017	30,91	214	6,50
Agosto	2067	62,83	1678	51,00
Setembro	2067	62,83	1986	60,36
Outubro	1317	40,03	1837	55,84
Novembro	1317	40,03	1837	55,84
Dezembro	1317	40,03	1529	46,47
Média mensal	1362	41,40	1327	40,34

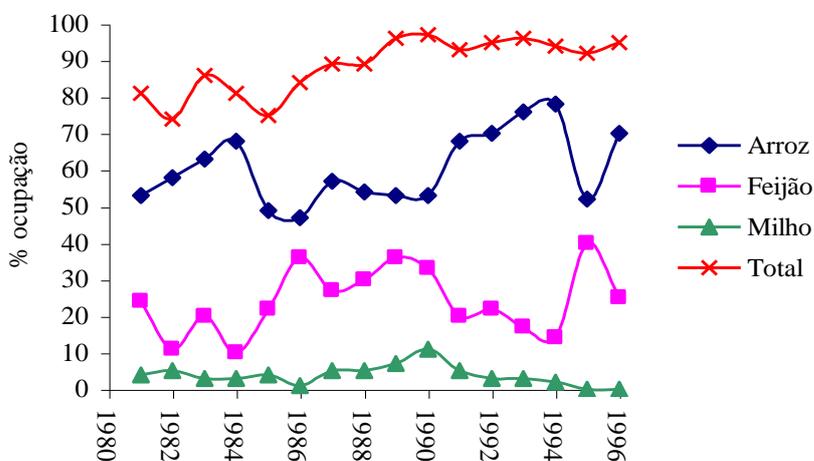


Figura 1 – Evolução da área ocupada (%) com as culturas de arroz, milho e feijão no período de 1981 a 1996

A Tabela 7 relaciona mensalmente, o volume de água estimado conforme o modelo estudado e o derivado para o plano de cultivo do PIMN, considerando a quantidade de água utilizada durante o ano de 1997. Verifica-se que não houve demanda igual aos volumes das restrições consideradas nos períodos de janeiro/junho e julho/dezembro, respectivamente 751.640 mm.ha e 973.070 mm.ha. O volume de água derivado para o PIMN foi 6.401.400 mm.ha, enquanto que o volume estimado pelo modelo proposto foi de 3.028.557 mm.ha, ou seja, 47,3 % do total derivado. Ocorreu, portanto, uma folga sendo o preço-sombra igual a zero, indicando que o volume máximo mensal de água, que pode

ser derivado para a área de colonização não é restritivo quando o volume anual disponível é 64.014.000 m³.

Tabela 7 – Consumo de água (mm.ha) estimado para o modelo estudado e o derivado para o plano de cultivo do PIMN, considerando a quantidade de água utilizada durante o ano de 1997 (6.401.400 mm.ha).

Meses	Modelo estudado	Plano de Cultivo PIMN
Janeiro	46202	361580
Fevereiro	114622	751640
Março	0	563740
Abril	0	534040
Mai	78260	331090
Junho	160327	470480
Julho	141016	690092
Agosto	650379	929180
Setembro	704424	973070
Outubro	444150	358280
Novembro	377539	358280
Dezembro	311784	79100
Consumo anual (mm.ha)	3028556	6401400
Preço-sombra da água (R\$/mm.ha)	0,00	

A Tabela 8 apresenta os custos marginais e os valores mínimos da contribuição ao lucro das culturas não recomendadas pelo modelo, denominadas variáveis não básicas. Os custos marginais se referem à redução da receita líquida por unidade de área cultivada ao se forçar a entrada de uma unidade de uma variável não pertencente à base da solução, tudo mais permanecendo constante. Por exemplo, a cultura do feijão não foi recomendada seu cultivo no mês de setembro; neste caso existe um custo marginal associado a essa atividade, isto é, para cada hectare cultivado com feijão nessa época, irrigando-se sem déficit (793,1 mm) ocorrerá uma redução de R\$ 11,00/ha na receita líquida.

Os valores mínimos da contribuição ao lucro atribuídos às culturas, irrigadas sem déficit (Tabela 8), significam os valores mínimos para que seus cultivos possam ser indicados. A cultura do feijão não deverá ser recomendada sua semeadura no mês de setembro, enquanto sua receita marginal líquida for inferior a R\$170,00/ha; as culturas de laranja e acerola também não serão recomendadas, enquanto suas receitas líquidas marginais forem inferiores a R\$ 810,00/ha.

A solução ótima do modelo indicou o cultivo das seguintes culturas no limite superior da restrição de área (Tabela 9): milho semeado em janeiro (130 ha), arroz semeado em fevereiro (1050 ha) e agosto (1050 ha), feijão semeado em julho (750 ha) e banana (155 ha). Os custos marginais estão associados a essas atividades com restrição de área (Tabela 9); para o feijão semeado em julho, o valor é de R\$ 170,00/ha, significando que ao se cultivar uma hectare a menos, a renda líquida será reduzida desse valor.

Tabela 8 – Custos marginais associados às atividades não básicas e valor mínimo da contribuição ao lucro para um volume anual de água disponível de 64.014.000 m³.

Cultura	Semeadura (mês)	Custo Marginal (R\$.ha ⁻¹)	Mínima Contribuição ao Lucro (R\$.ha ⁻¹)
Feijão	Setembro	11,00	170,00
Laranja	*	69,00	810,00
Acerola	*	170,00	810,00

(*) cultura perene

Tabela 9 – Custos marginais associados às atividades básicas com restrições de área e cuja solução foi o limite da restrição.

Cultura	Semeadura (mês)	Restrição de Área (ha)	Área Ocupada (ha)	Custo Marginal (R\$.ha ⁻¹)
Milho	Janeiro	≤ 130	130	530,00
Feijão	Julho	≥ 380 e ≤ 750	750	170,00
Banana	*	≤ 155	155	1260,00
Arroz	Fevereiro	≤ 1050	1050	322,00
Arroz	Agosto	≤ 1050	1050	191,00

(*) cultura perene

Como os coeficientes técnicos do modelo de programação linear não são conhecidos com exatidão e muitas vezes estimados, estando assim sujeitos a variações, se faz necessário determinar os intervalos nos quais a solução se mantém ótima. E isto é possível através da análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo de programação linear (Bazaraa et al., 1990). Ao se executar a sensibilidade de uma variável, todas as demais variáveis e seus coeficientes permanecem inalterados.

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

A análise compreende as possíveis variações na receita líquida marginal de uma atividade básica sem que se alterem os níveis da solução ótima. Na Tabela 10 encontram-se os valores atuais utilizados no modelo e os intervalos de variação permitidos à receita líquida marginal encontrados na solução ótima do problema, cujos limites são identificados pelas receitas marginais mínimas e máximas.

Tabela 10 - Análise de sensibilidade da receita líquida marginal das variáveis básicas

Variável	Semeadura (mês)	Valor da Variável (ha)	Receita Líquida Marginal (R\$/ha)	
			Mínima	Atual
Arroz	Fevereiro	1050	0,00	322,00

Arroz	Agosto	1050	0,00	191,00

Feijão	Julho	750	159,00	170,00

Milho	Janeiro	130	0,00	530,00

Banana	*	155	0,00	1.260,00

Coco	*	112	741,00	810,00

Verifica-se que a cultura do arroz semeado em fevereiro (irrigado com a lâmina de 273,2 mm) e em agosto (irrigado com a lâmina 1604,9 mm), permanecerá na base, com 1050 ha, limite superior da restrição, para qualquer valor da receita marginal líquida superior a zero. Semelhantemente, o milho semeado em janeiro e irrigado com lâmina de 138,1 mm, permanecerá na base, 130 ha, limite superior da restrição, para qualquer valor da receita marginal superior a zero. O mesmo ocorrendo com a

cultura da banana, irrigada com lâmina de 2270 mm, a qual permanecerá na base, com 155 ha (limite superior da restrição), para qualquer valor da receita marginal líquida superior a zero.

O feijão deverá ser cultivado com área de 750 ha (limite superior da restrição) e lâmina de irrigação de 696,1 mm, para qualquer valor de receita líquida marginal superior a R\$ 159,00/ha. Receitas líquidas marginais inferiores a esse valor, reduziria sua área até o limite de 380 ha (limite inferior da restrição).

A cultura do coco irrigada com lâmina de 1470,3 mm, permanecerá na base, com 112 ha, para qualquer valor de receita líquida marginal superior a R\$ 741,00/ha. Receitas líquidas marginais inferiores a esse valor, reduziria sua área ou até mesmo forçaria sua saída da solução ótima.

Na Tabela 11 encontram-se os volumes de água mensais e o anual utilizados pelas atividades, considerando uma disponibilidade anual máxima de 64.014.000 m³ e mensal de 7.516.400 m³ e 9.730.700 m³, respectivamente, para os períodos de janeiro/junho e julho/dezembro. Observa-se nesse período a inexistência de restrição do fator de produção água no PIMN, não sendo limitante por conseguinte, à produção das culturas. Como houve folga no volume de água disponível anual e mensal e como o excesso de recurso não é utilizado para aumentar a receita líquida, o preço sombra é zero.

Tabela 11 –Análise de sensibilidade do volume de água mensal e anual do modelo estudado.

Mês	Estado	Volume disponível (mm.ha)	Volume utilizado (mm.ha)	Folga (mm.ha)	Preço sombra (R\$/mm.ha)	Volume mínimo (mm.ha)	Volume máximo (mm.ha)
Jan	não limitante	751640	46202	705438	0,00	46202	****
Fev	não limitante	751640	114622	637018	0,00	114622	****
Mar	não limitante	751640	0	751640	0,00	0	****
Abr	não limitante	751640	0	751640	0,00	0	****
Mai	não limitante	751640	78260	673380	0,00	78260	****
Jun	não limitante	751640	160327	591313	0,00	160327	****
Jul	não limitante	973070	141016	832054	0,00	141016	****
Ago	não limitante	973070	650379	322691	0,00	650379	****
Set	não limitante	973070	704424	268646	0,00	704424	****
Out	não limitante	973070	444150	528920	0,00	444150	****
Nov	não limitante	973070	377539	595531	0,00	377539	****
Dez	não limitante	973070	311784	661286	0,00	311784	****
Ano	não limitante	6401400	3028556	3372844	0,00	3028556	****

Os valores mínimos e máximos para os volumes de água (Tabela 11) representam os limites de disponibilidade de água para os quais os preços sombras são válidos e a solução atual não é

alterada. Observa-se que só foram apresentados limites inferiores tanto para os volumes disponíveis mensais quanto para o volume anual disponível. Por exemplo, para o mês de janeiro, volumes disponíveis superiores a 46.202 mm.ha (462.020 m³) mantém a solução ótima atual e o preço sombra igual a zero. Para os meses de março e abril, a solução ótima atual não se alterará assim como o preço sombra, se os volumes disponíveis forem iguais ou superiores a zero. Para o volume anual, a solução ótima permanecerá se o volume disponível for superior a 3.028.556 mm.ha (30.285.560 m³). O mês de setembro caracterizou-se como o de maior consumo, proporcionando assim o maior valor dentro os limites inferiores (volume mínimo).

O resultado da análise de sensibilidade do recurso terra está apresentado na Tabela 12. A segunda coluna (área ocupada) está relacionada a quantidade de recurso associado a cada restrição, utilizada pelas variáveis do modelo. A terceira coluna (quantidade de folga), corresponde a quantidade de recurso não utilizado pelas atividades. A quarta coluna (preço sombra) relaciona os preços sombras dos recursos escassos, ou seja, aqueles com folga igual a zero. A quinta e sexta colunas apresentam os valores mínimos e máximos que podem ser utilizados pelas restrições, sem que a solução básica seja alterada.

Tabela 12 – Análise de sensibilidade do recurso terra ocupada mensalmente, para um volume anual de água disponível de 64.014.000 m³.

Mês	Área Ocupada (ha)	Quantidade e de Folga (ha)	Preço Sombra (R\$/ha)	Área Mínima (ha)	Área Máxima (ha)
Janeiro	397	2893	0,00	397	****
Fevereiro	1447	1843	0,00	1447	****
Março	1447	1843	0,00	1447	****
Abril	1317	1973	0,00	1317	****
Mai	1317	1973	0,00	1317	****
Junho	1317	1973	0,00	1317	****
Julho	1017	2273	0,00	1017	****
Agosto	2067	1223	0,00	2067	****
Setembro	2067	1223	0,00	2067	****
Outubro	1317	1973	0,00	1317	****
Novembr	1317	1973	0,00	1317	****
o					
Dezembr	1317	1973	0,00	1317	****
o					

Observa-se também que em todos os meses do ano, as áreas ocupadas nunca atingiram o valor da área disponível 3290 ha, apresentando folga, conseqüentemente com preço-sombra igual a zero, indicando que o recurso terra não é restritivo. Verifica-se ainda, que o modelo só apresenta limite de área mínima, ou seja, mínimo valor que pode ser utilizado pelas restrições sem que as variáveis básicas da solução ótima sejam alteradas.

Observa-se na Tabela 13 a recomendação das mesmas culturas (arroz em fevereiro e em agosto, feijão em julho, milho em janeiro, banana e coco), em quatro níveis de disponibilidade de água, excetuando-se o arroz semeado em agosto para o volume de água de 1.280.000 mm.ha.

A disponibilidade de água dentro dos limites simulados não influenciou nas áreas cultivadas com milho, banana, coco e arroz (semeado em fevereiro), entretanto a área de feijão semeado em julho reduziu em 91 ha (12,1%), no menor nível de disponibilidade de água (1.280.000 mm.ha).

A área total cultivada aumentou com o aumento da disponibilidade de água, porém com taxas de incremento cada vez menores. As receitas líquidas aumentaram com o aumento da oferta de água, no entanto, o incremento de renda diminuiu à medida que ocorreu aumento no recurso de água, ou seja, a eficiência econômica da água diminuiu com o aumento da oferta de água. Dantas Neto (1994)

observou também esse mesmo fato, na otimização do Projeto Senador Nilo Coelho, Petrolina – PE, utilizando modelos de programação linear.

Na Figura 4, pode-se constatar também que as receitas líquidas aumentaram com a disponibilidade de água de 30.285.560 m³ (\cong 3000 x 1000 mm.ha), permanecendo inalteradas no valor de R\$ 1.021.070,00 a partir daí.

A análise de sensibilidade foi realizada considerando a simulação dos quatro níveis de disponibilidade de água: 1.280.000 mm.ha (12.800.000 m³); 1.920.000 mm.ha (19.200.000 m³); 2.560.000 mm.ha (25.600.00 m³) e 6.401.400 mm.ha (64.014.000 m³).

Verificou-se o comportamento das variáveis, assim como as mudanças dos limites especificados nas restrições, sem que ocorresse mudança na solução ótima original do problema.

Observa-se na Tabela 14 que o aumento da disponibilidade de água pouco influenciou nas variáveis básicas do modelo (arroz semeado em fevereiro e agosto, feijão em julho, milho em janeiro, banana e coco), excetuando-se o menor volume de água (1.280.000 mm.ha), onde não aparece o arroz semeado em agosto. Com exceção do arroz semeado em agosto que apresenta valor de limite máximo para quase todos os níveis de volume de água, as demais culturas só apresentam valores de limites mínimos para os coeficientes marginais, indicando que a partir desse limite, a solução básica não será alterada

Tabela 13– Solução ótima obtida pelo modelo para quatro níveis de disponibilidade de água.

Culturas	Semeadura (mês)	Disponibilidade de água (mm.há)			
		1.280.000	1.920.000	2.560.000	6.401.400
Arroz	Fevereiro	1050	1050	1050	1050
Arroz	Agosto	-	359	758	1050
Feijão	Julho	659	750	750	750
Milho	Janeiro	130	130	130	130
Banana	*	155	155	155	155
Coco	*	112	112	112	112
Área total (ha)		2106	2556	2955	3247
Incremento na área (%)			21,4	15,6	9,9
Receita Líquida (R\$)		805.033,75	889.140,09	965.306,82	1.021.070,00
Incremento na Receita líquida (R\$)			84.106,34	76.166,73	55.763,18

(*) cultura perene

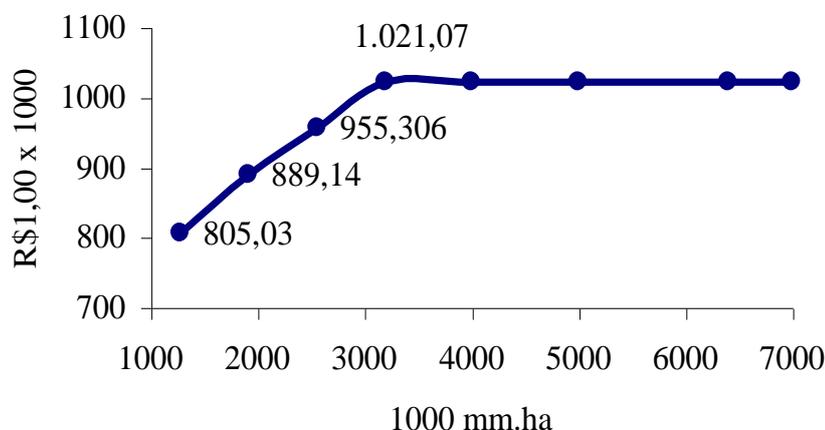


Figura 2 – Análise comparativa entre as receitas líquidas e os volumes anuais de água disponíveis

Tabela 14 - Análise de sensibilidade da receita líquida marginal das variáveis básicas para quatro níveis de disponibilidade de água (mm.ha)

1.280.000 mm.ha					
Variável	Semeadura (mês)	Valor da Variável (ha)	Receita Líquida Marginal (R\$.ha ⁻¹)		
			Mínima	Atual	Máxima
Arroz	Fevereiro	1050	66,72	322,00	****
Feijão	Julho	659	139,55	170,00	383,48
Milho	Janeiro	130	33,72	530,00	****
Banana	***	155	554,37	1260,00	****
Coco	***	112	708,49	810,00	****
1.920.000 mm.ha					
Variável	Semeadura (mês)	Valor da Variável (ha)	Receita Líquida Marginal (R\$.ha ⁻¹)		
			Mínima	Atual	Máxima
Arroz	Fevereiro	1050	32,51	322,00	****
Arroz	Agosto	359	0,00	191,00	391,94
Feijão	Julho	750	147,45	170,00	****
Milho	Janeiro	130	16,43	530,00	****
Banana	***	155	270,15	1260,00	****
Coco	***	112	725,15	810,00	****
2.560.000 mm.ha					
Variável	Semeadura (mês)	Valor da Variável (ha)	Receita Líquida Marginal (R\$.ha ⁻¹)		
			Mínima	Atual	Máxima
Arroz	Fevereiro	1050	32,51	322,00	****
Arroz	Agosto	758	0,00	191,00	391,94
Feijão	Julho	750	147,45	170,00	****
Milho	Janeiro	130	16,43	530,00	****
Banana	***	155	270,15	1260,00	****
Coco	***	112	725,15	810,00	****
6.401.400 mm.ha					
Variável	Semeadura (mês)	Valor da Variável (ha)	Receita Líquida Marginal (R\$.ha ⁻¹)		
			Mínima	Atual	Máxima
Arroz	Fevereiro	1050	0,00	322,00	****
Arroz	Agosto	1050	0,00	191,00	****
Feijão	Julho	750	159,00	170,00	****
Milho	Janeiro	130	0,00	530,00	****
Banana	***	155	0,00	1260,00	****
Coco	***	112	741,00	810,00	****

Na Tabela 15 verifica-se que em todos os meses do ano, nos quatro níveis de disponibilidade água, os volumes utilizados não atingiram os valores estabelecidos nas restrições, apresentando somente valores mínimos de água mensal.

Em relação ao volume anual de água, o preço sombra da água diminui com o incremento no volume disponível. Observa-se ainda, que o nível de disponibilidade de água de 1.280.000 mm.ha apresenta o maior preço sombra, R\$ 0,24 mm.ha, ou seja, para cada mm.ha de água a ser utilizada a mais aumentará o valor da função (receita líquida) em R\$ 0,24 e cada mm.ha a menos, reduzirá o valor da função objetivo na mesma quantidade.

Tabela 15 – Análise de sensibilidade do volume de água mensal e anual para quatro níveis de disponibilidade de água (mm.ha)

Mês	1.280.000			1.920.000		
	Preço Sombra (R\$/mm.ha)	Volume Mínimo (mm.ha)	Volume Máximo (mm.ha)	Preço Sombra (R\$/mm.ha)	Volume Mínimo (mm.ha)	Volume Máximo (mm.ha)
Janeiro	0,00	46202	****	0,00	46202	****
Fevereiro	0,00	114622	****	0,00	114622	****
Março	0,00	0	****	0,00	0	****
Abril	0,00	0	****	0,00	0	****
Maio	0,00	78260	****	0,00	78260	****
Junho	0,00	160327	****	0,00	160327	****
Julho	0,00	130349	****	0,00	141016	****
Agosto	0,00	267136	****	0,00	415945	****
Setembro	0,00	265159	****	0,00	432483	****
Outubro	0,00	81480	****	0,00	205571	****
Novembro	0,00	74929	****	0,00	178470	****
Dezembro	0,00	61674	****	0,00	147251	****
Total Água	0,24	1280000	****	0,12	1920000	****
Mês	2.560.000			6.401.400		
	Preço Sombra (R\$/mm.ha)	Volume Mínimo (mm.ha)	Volume Máximo (mm.ha)	Preço Sombra (R\$/mm.ha)	Volume Mínimo (mm.ha)	Volume Máximo (mm.ha)
Janeiro	0,00	46202	****	0,00	46202	****
Fevereiro	0,00	114622	****	0,00	114622	****
Março	0,00	0	****	0,00	0	****
Abril	0,00	0	****	0,00	0	****
Maio	0,00	78260	****	0,00	78260	****
Junho	0,00	160327	****	0,00	160327	****
Julho	0,00	141016	****	0,00	141016	****
Agosto	0,00	551290	****	0,00	650379	****
Setembro	0,00	589482	****	0,00	704424	****
Outubro	0,00	343310	****	0,00	444150	****
Novembro	0,00	293398	****	0,00	377539	****
Dezembro	0,00	242240	****	0,00	311784	****
Total Água	0,12	2560000	****	0,00	3028556	****

A Figura 3 representa o preço-sombra da água em função de volumes anuais disponíveis. Foi derivado para os usuários do Projeto de Irrigação Morada Nova 64.014.000 m³ em 1997. Do volume de 30.285.560 m³ ($\cong 30285 \times 1.000 \text{ m}^3$) em diante, o aumento da receita líquida por unidade de volume adicional é zero. Pode-se afirmar então que no ano agrícola de 1997 foi derivado para o PIMN mais água que o necessário.

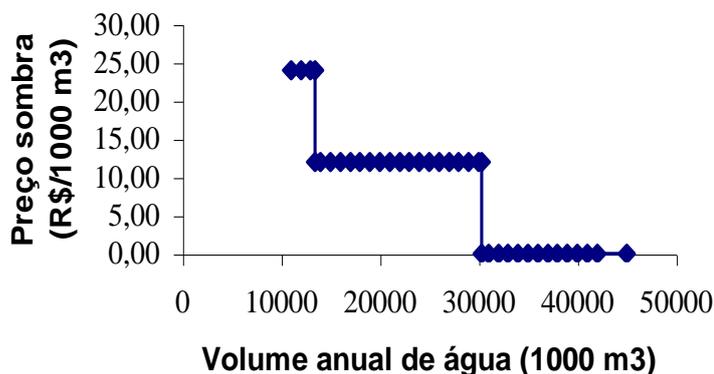


Figura 3 – Preço sombra da água em função de volumes anuais disponíveis, para um volume mensal de 7.516.400 m³ e 9.730.700 m³ respectivamente, nos períodos de janeiro a junho e julho a dezembro.

6 CONCLUSÕES

Com base nas culturas consideradas, nas restrições de área cultivada, nos preços e nos custos de produção, os resultados permitem as seguintes conclusões:

- o modelo de programação linear recomendou para o Projeto de Irrigação Morada Nova (PIMN) os cultivos de 1.050 ha de arroz semeado em fevereiro, 1.050 ha de arroz semeado em agosto, 750 ha de feijão semeado em julho, 130 ha de milho semeado em janeiro, 155 ha de banana e 112 ha de coco, para um volume anual de água utilizado de 30.285.560 m³;
- o modelo de otimização desenvolvido apresentou uma receita líquida 19,06 % maior que a obtida com o plano de cultivo do PIMN e um volume anual utilizado inferior em 47,3 %, considerando o ano agrícola de 1997;
- a cultura de feijão semeado em setembro só será recomendada se a receita líquida marginal for maior que R\$ 170,00, já as culturas de laranja e acerola se a receita líquida marginal for maior que R\$ 810,00;
- a ocupação da terra foi baixa, com percentuais médios anuais de 41,4% e 40,3% respectivamente, para o modelo proposto e o plano de cultivo do PIMN;
- mantendo-se o volume mensal disponível em 7.516.400 m³ e 9.730.700 m³ respectivamente, para os períodos de janeiro a junho e de julho a dezembro, volumes anuais superiores a 30.285.560 m³ não contribuíram para o aumento da máxima receita líquida do PIMN;
- a análise de sensibilidade do recurso terra apresentou preço sombra zero, indicando que esse recurso não é restritivo;
- o estudo efetuado com quatro níveis de disponibilidade de água demonstrou que as receitas líquidas aumentaram com o aumento do volume da água disponível, no entanto, o incremento da renda diminuiu à medida que aumentou o recurso água.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARCE, R. A. B. *Otimização de um projeto hidroagrícola, no município de Guaiá (SP), utilizando programação linear*. Piracicaba, 1990. 76p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.

- BAZARAA, M. S. et al. *Linear programming and network flows*. 2. ed. New York: Wiley, 1990. 684p.
- BENEDINI, M. Developments and possibilities of optimization models. *Agric. Water Manage.* v.13, p.329-58, 1988.
- BERNARDO, D. J. et al. Irrigation optimization under limited water supply. *Trans. ASAE (Am. Soc. Agric. Eng.)*, v.31, p.712-9, 1988.
- BOMAN, B. J., HILL, R. W. LP operation model for on-demand canal systems. *J. Irrig. Drainage Eng.* v.115, p. 687-00, 1989.
- BULLER, O. et al. Modeled crop water use and soil water drainage. *Agric. Water Manage.* v.19, p.117-34, 1991.
- CASTRO, L. C. A. *Análise da irrigação por sulcos utilizando a metodologia do balanço de volume*. Fortaleza, 1997. 91p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Irrigação e Drenagem) - Universidade Federal do Ceará.
- DANTAS NETO, J. *Modelos de decisão para otimização do padrão de cultivo em áreas irrigadas, baseados nas funções de respostas das culturas à água*. Botucatu, 1994. 125p. Tese (Doutorado em Agronomia/Irrigação e Drenagem) – Faculdade de Ciências Agrônômicas do Campus de Botucatu, Universidade Estadual Paulista.
- DOORENBOS, J., KASSAN, A. H. *Efeito da água no rendimento das culturas*. Campina Grande: UFPB, 1994. 306p. (Estudos da FAO: Irrigação e Drenagem, 33).
- DNOCS. *Fichas técnicas dos perímetros irrigados: Perímetro Irrigado de Morada Nova*. Fortaleza, 1992. 129p.
- DNOCS. *Sugestões técnicas e perspectivas econômicas para as principais culturas trabalhadas nos perímetros irrigados sob a jurisdição do DNOCS*. Fortaleza, 1996. 67p.
- DNOCS. *Planejamento de operação e manutenção e cálculo da tarifa d'água de irrigação do Perímetro Irrigado de Morada Nova*. Fortaleza, 1997a. 8p.
- DNOCS. *Relatório agropecuário semestral do Perímetro Irrigado de Morada Nova*. Fortaleza: 2ª Diretoria Regional, Divisão de Assistência aos Perímetros, 1997b. 10p.
- FERREIRA, L.M.S., WARWYCK, D.R.N., SIQUEIRA, L.A. *A cultura do coqueiro no Brasil*. 2. ed. Brasília: EMBRAPA. 1998. 292p.
- FRIZZONE, J.A. et al. Alocação de água e combinação de atividades pela programação linear em um projeto hidroagrícola no município de Guaíra(SP). *Sci. Agric.* (Piracicaba), v..51, p.524-32, 1994.
- 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*. Piracicaba, 1996. 57p. Tese (Livre Docente): Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, USP.
- HILLIER, F. S., LIEBERMAN, G. J. *Introdução a pesquisa operacional*. São Paulo: EDUSP, 1988. 805p.
- HUANG, W. Y. et al. *Optimizing water utilization through multiple crops scheduling*. *Trans. ASAE (Am. Soc. Agric. Eng.)*, v.18, p.293-8, 1975.

- ROSA JUNIOR, C. D. M. et. al. *Aceloreira: cultivo sob condição irrigada (primeira aproximação)*. Recife: SEBRAE/CODEVASF, 1994. 32p.
- MAINIÉ, P. *Cálculo económico en agricultura: aplicación de los programas lineales y de juegos*. Zaragoza: Acribia, 1969. 192p
- MAINUDDIN, N. M. et al. Optimal crop planning model for an existing groundwater irrigation project in Thailand. *Agric. Water Manage.*, n.33, p.43-62, 1997.
- MANNOCCHI, F., MECARELLI, P. Optimization analysis of deficit irrigation systems. *J. Irrig. Drainage Eng.*, v.120, n.3, p.484-503, 1994.
- MATANGA, G. B., MARIÑO, M. A. Irrigation planning. I. Crop pattern. *Water Resources Res.* v.15, p.672-8, 1979.
- MENDES, A. J. P. *Estabelecimento de calendários de irrigação para o manejo racional do perímetro K do Projeto de Irrigação de Morada Nova "utilizando o programa CROPWAT"*. Fortaleza, 1997. 115p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Irrigação e Drenagem) - Universidade Federal do Ceará.
- SUMA ECONÔMICA. São Paulo: Tama, n. 235, 1998. 42p.
- TRAVA, J. et al. Optimal on-farm allocation of irrigation water. *Trans. ASAE (Am. Soc. Agric. Eng.)*, v.20, p.85-95, 1977.
- TSAI, Y. J. et al. Optimizing multiplecropping systems: approach. *Trans. ASAE*, v.30, p.1554-61, 1987.
- TSAKIRIS, G., KIOUNTOUZIS, E. A model for the optimal operation of an irrigation system. *Agric. Water Manage.* p.241-52, 1982.
- WU, I., LIANG, T. Optimal irrigation quantity and frequency. *J. Irrig. Drainage Division*, v.98, n.1R1, p.117-33, 1972.
- YARON, D., BRESLER, E. Economic analyses of an-farm irrigation using response functions of crop. *Adv. Irrig.*, v.2, p.223-55, 1983.