

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**EVELINE VIANA SALGADO**

**ANÁLISE TÉCNICO-ECONÔMICA DA CUNHÃ EM FUNÇÃO DE LÂMINAS DE  
ÁGUA E ADUBAÇÃO FOSFATADA NO VALE DO CURU, CEARÁ.**

**FORTALEZA**

**2008**

EVELINE VIANA SALGADO

ANÁLISE TÉCNICO-ECONÔMICA DA CUNHÃ EM FUNÇÃO DE LÂMINAS DE  
ÁGUA E ADUBAÇÃO FOSFATADA NO VALE DO CURU, CEARÁ.

Dissertação submetida à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Agrícola.

Área de concentração: Irrigação e Drenagem

Orientador: Prof. Dr. Raimundo Nonato Távora Costa

FORTALEZA

2008

EVELINE VIANA SALGADO

ANÁLISE TÉCNICO-ECONÔMICA DA CUNHÃ EM FUNÇÃO DE LÂMINAS DE  
ÁGUA E ADUBAÇÃO FOSFATADA NO VALE DO CURU, CEARÁ.

Dissertação submetida à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Agrícola. Área de concentração: Irrigação e Drenagem

Aprovada em: 22 de agosto de 2008.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Raimundo Nonato Távora Costa (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará - UFC

---

Prof<sup>a</sup>. Dra. Maria Socorro de Souza Carneiro (Conselheira)  
Universidade Federal do Ceará - UFC

---

Prof. Dr. Luís Carlos Uchôa Saunders (Conselheiro)  
Universidade Federal do Ceará - UFC

A meus pais, Francisco Salgado e Maria Leonor Viana Salgado que são para mim, o maior exemplo de honestidade, integridade, dignidade e respeito, quero registrar ainda meus sinceros agradecimentos e reconhecimento pelo grande elo existente entre nós, o amor, e isto é o que me impulsiona na vida a seguir sempre em frente.

Ao meu grande amor, esposo, amigo, companheiro ... Carlos Eduardo Braga Cruz, por sua presença constante em todos os momentos vividos.

A minha filhinha, Maria Eduarda Salgado Cruz, simplesmente por ter realizado meu maior sonho, ser mãe.

Aos meus irmãos: Rosinha, Solange, Kleber e Cláudio pela amizade e companheirismo que cultivamos através de uma convivência harmoniosa.

Aos meus sobrinhos: Samira, Simara, Suellen, Gabriel, Samuel, Emanuel, Sarah, Priscila, Bianca, Letícia, Caroline, Carlos Jáder, Julianne, Marianne, Carlos Alisson, Rafaella e Marissa pelo carinho e respeito.

A família do meu esposo que sempre acreditou no meu potencial.

**OFEREÇO**

## AGRADECIMENTOS

À Deus, meu grande guia, fonte da minha fé, amor e esperança, por sua presença viva em todos os momentos da minha vida;

À Maria Santíssima, minha maior intercessora, pela graça concedida;

Ao meu esposo pelo seu amor e companheirismo incansável em todos os momentos difíceis;

A minha família pela confiança, paciência e positividade durante este trabalho;

À Universidade Federal do Ceará, especialmente ao Centro de Ciências Agrárias pela realização profissional;

Ao grande amigo, conselheiro e orientador, Professor Raimundo Nonato Távora Costa, pelos ensinamentos, apoio e dedicação prestados, durante e depois da realização deste trabalho;

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pela concessão da bolsa de auxílio;

A Professora Maria Socorro de Souza Carneiro pela amizade, colaboração e sugestões apresentadas a esta dissertação;

Ao Professor Luís Carlos Uchôa Saunders, por ter aceito tão prestativamente participar deste trabalho;

A todos os professores do Departamento de Engenharia Agrícola, pelos ensinamentos prestados, e pela fundamental contribuição na minha vida profissional;

Aos meus amigos de longas caminhadas: Ana Paula, Ana Quitéria, Ana Raquel, Fabrícia, Giovanna, Juliana, Kleber, Nílvia, Olienaide, Regina, Rafaella, Fred;

Aos meus novos amigos de mestrado: Edivan, Andréia, Carmen, Cleyanderson, Karine, Marcos, Levi, Geocleber, Jefferson, Leila, Fabrício, Crisóstomo, Fernando, Deodato, Dimas, Fabilla, Tony, Diego, Beatriz, Jefferson, Leila, Flávio, Lúcio;

Ao Prof. Luiz Artur Clemente da Silva do Departamento de Economia Agrícola, pelo apoio na análise estatística dos dados;

Aos professores: Assis Júnior, Boanerges, Fernando, Pitombeira, Elizimar, Zione, Patrícia Verônica, Maria Lúcia, Lúcia Ramos, Marcos Araripe, Marcus Bezerra, Eunice, Omar, Adunias, Claudivan, Renato, José Carlos pela amizade construída;

Aos amigos Haroldo, Olavo, Wescley e “Pessoa”, pela indispensável ajuda prestada durante as atividades de campo;

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Agrícola e da Fazenda Experimental Vale do Curu da Universidade Federal do Ceará – UFC pelos serviços prestados no decorrer do curso, bem como do trabalho experimental;

A amiga Francisca Lígia de Castro Machado que compartilhou muitos momentos de angústia e se tornou para mim um grande exemplo de mulher e mãe;

A amiga Danielle Ferreira de Araújo, por ter ajudado na elaboração dos resultados;

Ao grande amigo Carlos Alexandre Gomes da Costa, pela amizade, convívio e companheirismo;

Enfim, a todos que, direta ou indiretamente contribuíram para o êxito deste trabalho.

# ANÁLISE TÉCNICO-ECONÔMICA DA CUNHÃ EM FUNÇÃO DE LÂMINAS DE ÁGUA E ADUBAÇÃO FOSFATADA NO VALE DO CURU, CEARÁ.

## RESUMO

O estudo teve como objetivo estudar o efeito das lâminas de água e dos níveis de fósforo e sua interação sobre a produtividade econômica e componentes de produção da cunhã (*Clitoria ternatea L.*). O experimento foi conduzido na Fazenda Experimental Vale do Curu, Pentecoste, Ceará, no período de setembro de 2007 a março de 2008. O delineamento experimental foi em blocos ao acaso com parcelas subdivididas, composto de quatro tratamentos primários nas parcelas, quatro tratamentos secundários nas subparcelas e quatro blocos. Os tratamentos constituíram-se da combinação de quatro lâminas de água ( $W_1=615,2$  mm;  $W_2=605,1$  mm;  $W_3=540,6$  mm e  $W_4=365,6$  mm) e quatro níveis de adubação fosfatada ( $P_0=0$ ;  $P_1=150$ ;  $P_2=300$ ;  $P_3=450$  kg.ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>). A cultura foi estabelecida no campo com espaçamento de 0,40 m x 0,40 m, irrigada por um sistema de aspersão convencional "Line Source Sprinkler System", com frequência de cinco dias. Conforme resultados obtidos, o fator de produção água influenciou em nível de significância de 1,3% a massa verde de forragem, no entanto, o fator de produção fósforo e a interação entre os dois fatores não apresentaram diferenças significativas entre os tratamentos em nível de 5% de probabilidade. A produtividade máxima estimada foi de 73726,7 kg.ha<sup>-1</sup>mm<sup>-1</sup>, obtido com a aplicação de 700,4 mm de água e 86,74 kg.ha<sup>-1</sup> de fósforo. O fator de produção água se apresentou limitante ao rendimento da cunhã, o mesmo não ocorrendo com o fator de produção fósforo. A produtividade média da água não apresentou alteração com os níveis de fósforo, o mesmo ocorrendo com os níveis de água superiores a 540 mm.

Palavras-chave: Leguminosa. *Clitoria ternatea L.* Forrageira. Irrigação. Análise econômica.

## TECHNICAL AND ECONOMICAL RESPONSE OF CUNHÃ CROP TO WATER AND PHOSPHATE FERTILIZER IN THE CURU VALLEY, CEARÁ.

### ABSTRACT

This study had as its objective to study the effect of water depths and phosphorus levels and their interaction on productivity and economic components of the production cunhã (*Clitoria ternatea L.*). The experiment was conducted at the Curu Valley Experimental Farm in Pentecoste - Ceará in the period of september 2007 to March 2008. The experimental design was in randomized blocks with split plots, composed of four primary treatments in the plots, four secondary treatments in subplots and four blocks. The treatments is the combination of four irrigation depths ( $W_1 = 615.2$  mm;  $W_2 = 605.1$  mm;  $W_3 = 540.6$  mm;  $W_4 = 365.6$  mm) with four levels of phosphate fertilizer ( $P_0 = 0$ ;  $P_1 = 150$ ;  $P_2 = 300$ ;  $P_3 = 450$  kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>). The crop was established in the field in the spacing of 0.40 m x 0.40 m, being irrigated by a conventional spraying system (Line Source Sprinkler System), with frequency of five days. As results, the factor of production water influenced to a significance level of 1.3% the forage green mass, however, the factor of production phosphorus and the interaction between the two factors showed no significant difference between treatments at 5% level of probability. The maximum yield was estimated 73726.7 kg ha<sup>-1</sup>mm<sup>-1</sup>, obtained with the application of 700.4 mm of water and 86.74 kg ha<sup>-1</sup> phosphorus. The factor of production water had been limiting the efficiency of cunha, that is not happening with the factor of production phosphorus. The average productivity of water presented no change to the levels of phosphorus, the same occurred with the water depths exceeding 540 mm.

Keywords: Legume trees. *Clitoria ternatea L.* Forrage trees. Irrigation. Economic analysis.



## LISTA DE FIGURAS

|           |  |    |
|-----------|--|----|
| Figura 1  | Vista da área do experimento.....  | 28 |
| Figura 2  | Semeadura manual da cunhã.....   | 30 |
| Figura 3  | Detalhe do aspersor.....   | 31 |
| Figura 4  | Linha de aspersores.....   | 31 |
| Figura 5  | Croqui do experimento ilustrando a distribuição de parcelas e subparcelas.....   | 33 |
| Figura 6  | Quadro coletor de material.....  | 34 |
| Figura 7  | Pesagem de massa verde.....  | 35 |
| Figura 8  | Curva da produtividade média da cunhã em função das lâminas de água.....   | 41 |
| Figura 9  | Curva da produtividade média da cunhã em função dos níveis de fósforo.....   | 41 |
| Figura 10 | Níveis de fósforo economicamente ótimos em função da relação entre o preço do fósforo e o preço da cunhã.....              | 45 |
| Figura 11 | Superfície de resposta da produtividade da cunhã em função das lâminas de água e dos níveis de fósforo.....                | 47 |
| Figura 12 | - Isoquantas ou curvas de isoprodutos para a produtividade da cunhã em função das lâminas de água e níveis de fósforo..... | 48 |
| Figura 13 | - Produtividade da água em função das lâminas de água.....   | 52 |

## LISTA DE TABELAS

|           |  |    |
|-----------|--|----|
| Tabela 1  | Atributos físicos e químicos do solo da área do experimento.....   | 29 |
| Tabela 2  | Características de fertilidade do solo da área do experimento.....   | 29 |
| Tabela 3  | Esquema da análise de variância associado ao delineamento experimental. ....   | 32 |
| Tabela 4  | Produtividade média da cunhã, em $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ , em função das lâminas de água, em mm, e dos níveis de fósforo, em $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ .....               | 39 |
| Tabela 5  | Resumo da análise de variância da produtividade da cunhã em função da lâmina de água e dos níveis de fósforo. ....   | 40 |
| Tabela 6  | Equações ajustadas da produtividade da cunhã em função dos níveis de fósforo, para cada lâmina de água.....  | 42 |
| Tabela 7  | Produto físico marginal do fósforo para os diferentes níveis de fósforo, correspondentes cada lâmina total de água. ....   | 43 |
| Tabela 8  | Níveis de fósforo economicamente ótimos em função da relação entre os preços do fósforo ( $P_P$ ) e da cunhã ( $P_Y$ ).....  | 44 |
| Tabela 9  | Análise de regressão múltipla da produtividade da cunhã ( $Y$ ) em função de diferentes lâminas totais de água ( $W$ ) e níveis de fósforo ( $P$ ), para dez modelos matemáticos. .... | 46 |
| Tabela 10 | Produto físico marginal da água para as diferentes lâminas de água (valor superior) e produto físico marginal do fósforo para os diferentes níveis de fósforo. ....                    | 49 |
| Tabela 11 | - Taxas marginais de substituição ( $\text{TMS}_{W/P}$ ) da água por fósforo e as lâminas de água e níveis de fósforo, correspondentes a cada nível pré-fixado de nutriente.....       | 51 |
| Tabela 12 | Valores médios da produtividade da água ( $\text{kg}\cdot\text{m}^3$ ) em função das lâminas totais de água e dos níveis de fósforo.....   | 52 |
| Tabela 13 | Valores médios da produtividade da água em ( $\text{R}\$/\text{m}^3$ ) em função das lâminas totais de água e dos níveis de fósforo. ....  | 52 |

## SUMÁRIO

|   |           |
|---|-----------|
| <b>LISTA DE FIGURAS.....</b>  | <b>9</b>  |
| <b>LISTA DE TABELAS .....</b>   | <b>10</b> |
| <b>1. INTRODUÇÃO .....</b>  | <b>16</b> |
| <b>2. REVISÃO DE LITERATURA.....</b>  | <b>18</b> |
| 2.1 A cultura da cunhã .....  | 18        |
| 2.2 Necessidades hídricas das culturas .....  | 19        |
| 2.3 Manejo da irrigação .....   | 21        |
| 2.4 Adubação fosfatada.....   | 23        |
| 2.5 Função de resposta .....  | 25        |
| <b>3. MATERIAL E MÉTODOS .....</b>  | <b>28</b> |
| 3.1 Caracterização da área do experimento.....  | 28        |
| 3.2 Instalação e manejo da cultura .....  | 29        |
| 3.3 Sistema e manejo da irrigação.....  | 30        |
| 3.4 Delineamento experimental .....   | 32        |
| 3.5 Produção de forragem.....   | 34        |
| 3.6 Função de produção .....  | 35        |
| 3.7 Isoquantas .....  | 36        |
| 3.8 Produto físico marginal da água e do fósforo .....                                | 37        |
| 3.9 Taxa marginal de substituição .....   | 37        |
| 3.10 Produtividade da água .....  | 38        |
| <b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>  | <b>39</b> |
| 4.1 Produtividade da cunhã em função das lâminas de água e dos níveis de fósforo..... | 39        |
| 4.2 Lâmina de água economicamente ótima .....   | 41        |
| 4.3 Nível de fósforo economicamente ótimo .....                                       | 42        |
| 4.4 Superfície de resposta.....   | 45        |
| 4.5 Isoquantas .....  | 47        |
| 4.6 Produtos físicos marginais da água e do fósforo .....                             | 48        |
| 4.7 Taxa marginal de substituição .....   | 50        |
| 4.8 Produtividade da água .....   | 51        |
| <b>5. CONCLUSÕES.....</b>   | <b>53</b> |
| <b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>  | <b>54</b> |
| <b>ANEXOS .....</b>   | <b>60</b> |

## 1. INTRODUÇÃO

De acordo com o IBGE (2008), a área média utilizada com pastagens no Brasil é de 172 milhões de hectares. A produção de pastagens vem sendo uma alternativa para a pecuária brasileira, tendo no aumento da produtividade, o grande responsável por inúmeras pesquisas, destacando-se o melhoramento genético de espécies cultivadas, adubação, técnicas de irrigação, aumento no número de cortes de espécies forrageiras por ano, técnicas de armazenamento, entre outras.

As pastagens, devido seu baixo custo de produção em relação aos concentrados, representam a forma mais prática e econômica de alimentação de bovinos e constituem a base de sustentação da pecuária do País.

Os altos custos com alimentação na produção animal, é hoje um fator limitante para o setor agropecuário, visto que de acordo com o tipo de animal produzido, estes custos podem alcançar entre 60 - 70% dos custos totais da produção. Com o aumento de preço dos grãos utilizados na formulação de concentrados, vêm se buscando alimentos alternativos para introduzir na dieta alimentar destes animais, a fim de baratear os custos totais na produção. A introdução de alimentos alternativos tais como resíduos industriais de panificadoras, laticínios, frutas e de pastagens naturais ou exóticas, como feno ou silagem, vem crescendo como suplemento alimentar.

A irregularidade do regime pluvial nas diferentes regiões brasileiras é considerado um fator de restrição ao desenvolvimento agrícola, pois, mesmo dentro de estações chuvosas, ocorrem períodos de déficit hídrico. Segundo Cunha et al. (2008), a evapotranspiração em pastagens, geralmente, excede a precipitação pluvial, sendo assim necessária a prática da irrigação para garantir que se produza com planejamento, sem que a falta de chuvas altere os índices de produtividade e de rentabilidade previamente estabelecidos. Os benefícios da irrigação são intensificados quando associados à adubação.

Depois da água e do nitrogênio, o fósforo é o nutriente mais limitante à produção das plantas forrageiras, sendo de fundamental importância, principalmente, no estabelecimento da cultura, estimulando a formação e o crescimento das raízes e o perfilhamento (WERNER, 1986).

Os custos de produção muitas vezes são elevados em razão dos produtores em geral produzirem técnicas empíricas que utilizam em excesso a aplicação de água e nutrientes

nas culturas. Estas técnicas prejudicam o manejo adequado em uma produção agrícola, decorrente das inúmeras perdas de água, seja por percolação e/ou lixiviação, e também de nutrientes, que muitas vezes são lavados no perfil do solo e permanecem fora do alcance das raízes, podendo atingir o lençol freático.

Dentre as plantas forrageiras, a cunhã apresenta-se como uma boa alternativa na produção de forragem nesta região, devido a sua rusticidade, adaptabilidade a uma larga variedade de solo, além de um feno com média de 26% de proteína bruta na matéria seca (GADELHA et al., 1982).

Devido esta problemática, surge a necessidade de pesquisas que contemplem informações técnicas que cheguem ao produtor, visando maximizar as receitas líquidas com a aplicação correta de água e insumos. O objetivo deste trabalho foi avaliar o desenvolvimento produtivo e econômico da cultura da cunhã (*Clitoria ternatea*, L.) irrigada por aspersão convencional sob diferentes lâminas de água e níveis de adubo fosfatado.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 A cultura da cunhã

A cunhã (*Clitoria ternatea L.*) é uma leguminosa tropical, perene, herbácea, originária da Ásia, que apresenta caules finos, com elevada massa foliar, produzindo feno de alta qualidade e boa palatabilidade. Possui boa resistência à seca, mas adapta-se melhor em solos bem drenados e com boa disponibilidade de água (MOREIRA et al., 1988).

É uma espécie essencialmente autógama com número de cromossomos  $2n = 16$ . As sementes apresentam dormência, caracterizada pela impermeabilidade do tegumento à água, também conhecido como “tegumento duro”. Este fenômeno interfere na germinação das sementes, que ocorre de forma lenta e irregular, prejudicando o estabelecimento da população de plantas (MOREIRA et al., 1988). Ainda conforme estes autores, a cunhã se adapta bem a uma larga variedade de solos, desde neossolos de textura fina aos de textura arenosa. No entanto, a cultura se desenvolve melhor em solos bem drenados, textura média, férteis, pH neutro, com alguma tolerância à salinidade. Desenvolve-se em uma faixa de precipitação que vai dos 400 aos 1500 mm anuais. Apresenta resistência regular à seca, baixa tolerância à geada, no entanto, não tolera encharcamento.

A cunhã apresenta alto nível de beta caroteno, elemento de significativa importância por ser o precursor da vitamina A. Na ausência da vitamina A, a fertilidade e saúde das fêmeas são afetadas: crescimento – retarda o desenvolvimento de estatura e ponderal nos animais jovens; reprodução – aumenta os chamados cios silenciosos, retarda a ovulação, diminui as taxas de concepção; gestação – provoca reabsorção de feto; produção – diminui a produção leiteira, altera a composição e diminui a qualidade do colostro (ACOSC, 2008).

O feno da cunhã é uma boa alternativa para suplementação alimentar no período seco, onde rebanhos são criados em pastagem nativa, especialmente nas condições do criatório do semi-árido nordestino (LOPES; ARAÚJO FILHO, 1981).

Em estudos desenvolvidos por Nascimento & Silva (2004), avaliando a quantidade e a qualidade de fitomassa de doze leguminosas para cobertura de solo, no município de Alagoinha, PB verificaram que em um Luvissole degradado, as espécies que

produziram uma maior quantidade de biomassa foram: leucena, guandu, kudzu tropical, feijão-de-porco, cunhã e mucuna cinza, respectivamente.

Souza et al. (1999) selecionando forrageiras nativas e exóticas para avaliação do germoplasma de espécies forrageiras utilizadas na alimentação de ovinos, verificaram que das forrageiras avaliadas por um período de três anos, as leguminosas leucena (*Leucaena leucocephala*), sabiá (*Mimosa caesalpinifolia*), jurema preta (*Mimosa tenuiflora*), jucazeiro (*Caesalpinia ferrea*), carquejo (*Caliandra depauperata*), camaratuba (*Cratylia molis*), cunhã (*Clitoria ternatea*) e as gramíneas capim buffel (*Cenchrus ciliaris*), capim gramão (*Cynodon dactylon* var. *aridus*), capim-corrente (*Urochloa mosambicensis*) capim-andropogon (*Andropogon gayanus* var. *bisquamulatus*) apresentaram desempenho superior às outras espécies avaliadas e podem ser recomendadas para melhorar a dieta de caprinos e ovinos, especialmente na época seca, na região semi-árida do Nordeste brasileiro. Segundo os mesmos autores a cunhã possui produção de matéria seca/hectare/ano entre 5000 – 15000 kg.

## 2.2 Necessidades hídricas das culturas

Devido ao fenômeno natural das secas no semi-árido e em zonas áridas, a irrigação passou a ser uma das principais alternativas, senão a única para que se tenha uma produção agropecuária de forma sustentável. A água é um fator de produção fundamental para o desenvolvimento das plantas. A partir do conhecimento da necessidade hídrica das plantas, deve-se proceder a um manejo adequado da irrigação, ou seja, conhecer o quanto e quando irrigar.

Os solos sob cultivo devem ser preparados de modo a alterar o mínimo possível as suas características físicas e químicas originais, especialmente aquelas que afetam a infiltração e retenção de água (CASTRO et al., 1987).

O requerimento de água pelas culturas é definido por Doorenbos & Pruitt (1992) como a lâmina de água necessária para compensar as perdas por evapotranspiração da cultura (ETc), sendo esta cultivada livre de doenças, em extensas áreas, em solo sem restrições de umidade e nutrientes e atingindo seu potencial de produção no ambiente de desenvolvimento considerado.

A maioria das culturas possui períodos críticos quanto à deficiência hídrica, durante os quais a falta de água causa sérios decréscimos na produtividade; os prejuízos

causados dependem da sua duração, severidade e do estágio de desenvolvimento da planta. (Folegatti et al., 1997). A obtenção de alta produtividade também requer adoção de práticas de manejo que visem melhorar a irrigação, a partir do conhecimento das necessidades hídricas das culturas.

Mendes (1997) propôs o estabelecimento de calendários de irrigação para o manejo racional do Perímetro K do Projeto de Irrigação Morada Nova utilizando o programa de computação “CROPWAT” da FAO. O autor verificou que os calendários de irrigação do projeto original mostraram-se inadequados.

Um dos principais problemas que ocorrem na agricultura é a forma com que são utilizados os recursos disponíveis. Uma produção eficiente e rentável deve constituir um dos principais objetivos da empresa agrícola. Para atingir este fim, devem-se utilizar racionalmente os fatores de produção, de tal maneira que sejam atingidos os mais altos níveis de produtividade econômica (FRIZZONE, 1995).

Rodrigues (2000) desenvolveu um modelo de programação linear para quantificar as variáveis do processo de produção, que otimizasse a operação do Perímetro Irrigado Morada Nova, Ceará. O estudo efetuado com quatro níveis de disponibilidade de água demonstrou que as receitas líquidas aumentaram com o aumento do volume de água disponível, no entanto, o incremento da renda diminuiu à medida que aumentou o recurso água.

A quantidade de água a ser aplicada é normalmente estimada pela necessidade hídrica da cultura, podendo ser através da sua evapotranspiração e/ou, por meio do balanço de água no solo. Assim como a aplicação de água atende às necessidades hídricas da planta, o uso de fertilizantes como correção do solo é prática indispensável para atender as exigências nutricionais das culturas, pelo qual garante o potencial produtivo e a manutenção da fertilidade do solo (SOUSA, 2000).

As principais limitações à produção agrícola na região Nordeste do Brasil, especificamente no semi-árido são a escassez e a irregularidade pluviométrica. Assim, a utilização da irrigação é indispensável à sustentabilidade do setor primário. O suprimento adequado de água por meio da irrigação possibilita à planta manter um contínuo fluxo de água e nutrientes do solo para as folhas, favorecendo os processos de crescimento, floração e frutificação da planta, o que acarretará em aumento da produtividade e melhoria da qualidade do produto (SANCHES; DANTAS, 1999; COELHO et al., 2003).

Colares (2004) realizou uma análise técnico-econômica do cultivo de arroz irrigado no Perímetro Irrigado Morada Nova, Ceará. Verificou que a eficiência de aplicação



de água está relacionada com a textura do solo. Verificou na unidade textural argilo-siltosa uma eficiência de aplicação de 66% e na unidade textural areia franca, uma eficiência de aplicação de apenas 35%.

### **2.3 Manejo da irrigação**

A água está se tornando um bem escasso em muitas partes do mundo. De acordo com Gates et al. (1991), a competição entre os centros urbanos e industriais impõe pressão sobre a agricultura irrigada, no sentido de promover melhoria quanto à eficiência do uso da água.

Frizzone (1993) destacou duas estratégias ótimas de irrigação baseadas na análise econômica de funções de produção: a) a disponibilidade de terra como único fator limitante da produção e neste caso, a água pode ser adquirida e aplicada a um custo unitário constante; a regra de otimização agroeconômica preconiza que a lâmina aplicada deva maximizar a receita líquida por unidade de área; b) a disponibilidade de água como único fator que limita a produção.

Segundo Bernardo (1997), a disponibilidade de água de boa qualidade é fundamental para as futuras gerações, e a irrigação tem provocado alterações no meio ambiente difíceis de serem previstas. É importante que venham a se estabelecer padrões claros para avaliação do impacto ambiental causado pela irrigação, a fim de aumentar o crescimento sem os problemas causados em alguns projetos em funcionamento. Em regiões semi-áridas, onde a água é um fator limitante, as pesquisas devem ser conduzidas de modo que se faça o planejamento de irrigações em termos de máxima produção por unidade de água aplicada.

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 cuidado especial, a fim de compatibilizar o balanço hídrico com a demanda, tanto no que se refere à quantidade como a sua repartição espacial e temporal. A bacia hidrográfica é a unidade básica de planejamento mais adequada para o aproveitamento e o controle racional da água.

No Nordeste brasileiro, a gestão dos recursos hídricos não tem sido administrada com um planejamento integrado da oferta e da utilização. As secas sucessivas aliadas à falta

total de planejamento dos órgãos públicos com relação à gestão da água fazem com que tenhamos plena convicção do colapso iminente desse setor.

O aumento de áreas irrigadas e a dependência quanto ao uso da irrigação vem enfrentando sérios desafios, que ameaçam a sustentabilidade dos recursos naturais, principalmente quanto à água e o solo.

Considerando que a irrigação é um notável usuário de água, a melhoria na eficiência de usos é uma importante preocupação para o futuro da sustentabilidade hídrica. O objetivo da gestão dos recursos é a otimização do uso da água, ao longo da bacia hidrográfica, para que todos os usuários tenham acesso à água, incluindo além dos usuários urbanos, industriais e agrícolas, a vida silvestre, pescadores de subsistência, dentre outros (FAO, 2002).

Um manejo eficiente da irrigação requer informações relacionadas às necessidades de água das culturas e da função de produção das culturas à água (SOARES et al., 2002).

Rassini & Leme (2001), estudando lâminas de irrigação em alfafa (*Medicago sativa L.*) observaram que as condições hídricas variaram de acordo com o estágio de desenvolvimento da leguminosa, permitindo otimizar o consumo de água de irrigação durante o seu cultivo, com a técnica de programação dinâmica (avaliação da quantidade ótima de água a ser aplicada nas culturas que possuem vários estádios de desenvolvimento).

A racionalização do uso da água é fundamental em todas as etapas do processo, desde a captação até sua aplicação nas culturas e no sistema de produção agrícola, incluindo a escolha do método e sistema de irrigação, redução das perdas na operação e manutenção dos sistemas, falhas na irrigação, ou seja, na aplicação de águas nas culturas que permitam otimizar o rendimento físico por unidade de área e unidade de água utilizada.

O manejo da irrigação permite identificar, com base em critérios técnicos, o momento para o início da irrigação e a quantidade de água para atender as necessidades hídricas da cultura. A otimização do uso da água na irrigação depende da necessidade hídrica das culturas, determinada pela sua evapotranspiração, e o suprimento natural por meio da precipitação efetiva.

Em qualquer sistema de irrigação é necessário que se faça um manejo racional da água, levando em consideração os aspectos sociais e ecológicos da região e procure maximizar a produtividade e a eficiência do uso da água e minimizar os custos, quer por mão-de-obra ou capital, mantendo as condições de umidade do solo e de fitossanidade favoráveis ao bom desenvolvimento da cultura irrigada.

Tem-se de considerar, no manejo da irrigação, parâmetros que dependem do tipo de sistema de irrigação e do projeto de irrigação, como: grau de automação, reúso da água que escoar no final da parcela, necessidade de sistematização do terreno, medição de vazão, custo e disponibilidade de água e de mão-de-obra, características da cultura etc., e parâmetros comuns a todos os sistemas de irrigação, ou seja, quando e quanto irrigar, uniformidade de aplicação, eficiência de irrigação, benefícios da irrigação (BERNARDO, 2006).

De acordo com Araújo Filho & Ribeiro (1996), na elaboração de projetos de irrigação, a magnitude da velocidade de infiltração básica serve de referência para a escolha dos métodos e sistemas de irrigação a adotar, sendo, portanto, uma variável relevante para a definição do manejo agrícola em sistemas irrigados. Vários são os fatores do solo que interferem na magnitude da velocidade de infiltração básica. Esses fatores estão associados às propriedades físicas do solo, da própria água, e do manejo adotado.

Gondim (1998) em estudo econômico-comparativo do monitoramento da irrigação com caupi através de tensiômetros, tanque Classe “A” e método de Hangreaves determinou que a irrigação monitorada pelos tensiômetros demandou menor quantidade de água (28% inferior ao tanque Classe “A” e 23% inferior a equação de Hargreaves).

Barros (1999), utilizando irrigação por sulcos em diferentes níveis de água e adubação nitrogenada na cultura do melão monitorou a umidade no solo com o uso de tensiômetros utilizando -50 kPa como potencial mátrico crítico, principal indicativo de quando irrigar, através do monitoramento do tensiômetro a 0,15 m de profundidade. Utilizando a mesma profundidade Soares et al. (2002) em estudo para obtenção de uma função de resposta da cultura da melancia em diferentes níveis de água e adubação nitrogenada utilizou como potencial mátrico crítico -30 kPa.

## **2.4 Adubação fosfatada**

A fertilidade e as práticas de adubação têm profunda influência sobre a quantidade e a qualidade das forrageiras, podendo influenciar a concentração de nutrientes na forragem, assim como seu consumo pelos animais (Correia, 1983). A disponibilidade de nutrientes às plantas é influenciada pelo balanço entre solo e água, assim como também pela temperatura do solo (LOPES, 1989).

A fertilidade do solo é vital para a produtividade das culturas, mas um solo fértil necessariamente pode não ser um solo produtivo, pois existem inúmeros fatores que afetam a fertilidade, sendo eles: a má drenagem, a seca, as queimadas, o manejo inadequado e outros fatores que podem limitar a produção mesmo que o solo tenha fertilidade adequada. Assim, para obtenção de elevadas produtividades faz-se necessário o manejo adequado da fertilidade do solo, devido à produção das culturas ser limitada pelo nutriente mineral menos disponível para as plantas (PESSOA et al., 1996; LOPES, 1989).

De acordo com Gomes (2000), o uso da tecnologia dos fertilizantes é amplamente recomendável quando se refere ao comportamento de uma cultura agrícola do ponto de vista agrônomo, em razão dos elevados diferenciais de rendimento físico que proporciona, desde que tenha sido feita a contrapartida do melhoramento genético da planta, no sentido de torná-la apta a absorver e responder, com altos rendimentos, aos principais nutrientes utilizados. Do ponto de vista econômico, espera-se que o lucro desejado dessa exploração deva ser maximizado, ou que os fatores envolvidos no processo produtivo devam ser combinados para determinarem à máxima eficiência econômica.

Martha Jr & Vilela (2002) comentam que a grande maioria das pastagens no Brasil está situada em áreas de baixa fertilidade, geralmente apresentando capacidade reduzida de fornecimento necessário de nutrientes para o desenvolvimento das plantas forrageiras cultivadas, como também características limitantes ao crescimento vegetal, tais como: acidez elevada e níveis tóxicos de alumínio e manganês. Com isto torna-se inviável o máximo potencial produtivo das forrageiras cultivadas.

De acordo com Lopes (1989), o fósforo aumenta o enraizamento das plântulas e resistência no período de inverno, melhora a eficiência no uso da água, favorece a resistência às doenças em algumas plantas, acelera a maturidade e é importante para a colheita e a qualidade da cultura.

O fósforo é um elemento essencial no metabolismo das plantas, desempenhando papel importante no armazenamento e transferência de energia da célula, na respiração, na fotossíntese, na divisão celular e de vários outros processos na planta. É também componente estrutural dos ácidos nucléicos de cromossomos, assim como de muitas coenzimas, fosfoproteínas e fosfolipídeos. Desse modo, limitações na disponibilidade de P no início do ciclo vegetativo podem resultar em restrições no desenvolvimento, das quais a planta não se recupera posteriormente, mesmo aumentando o suprimento de P a níveis adequados. O suprimento adequado de P é, diferentemente dos demais nutrientes, essencial desde os estádios iniciais de crescimento da planta (GRANT et al., 2001).

Gonçalves et al. (1997) estudando a consorciação entre gramíneas e leguminosas com adubação fosfatada no estado do Pará, verificaram que o nutriente fósforo influenciou significativamente na produção de forragem nas gramíneas estudadas, porém, não influenciou no rendimento das leguminosas. Em relação ao teor de matéria seca a maior resposta foi apresentada nas leguminosas.

Em estudos realizados com alfafa, no município de Piracicaba, SP, Sarmento et al. (2002) constataram que a adubação fosfatada tem importante influência na velocidade de rebrota desta espécie, assim como também pela quantidade de brotos produzidos pela planta. O número de brotos é considerado um dos componentes da produção de forragem (Fick et al., 1988), sendo utilizado como um indicador de vigor e persistência das pastagens (Da SILVA; PEREIRA, 1997).

Krolow et al. (2004), testando o efeito dos adubos fosfatados e potássicos com três leguminosas, avaliando seu desenvolvimento vegetativo e produção de nódulos em casa de vegetação no município de Capão do Leão-RS verificaram que apenas o fósforo influencia na produção de biomassa da parte aérea, do sistema radicular, na quantidade e tipo de nódulos nas três espécies de leguminosas.

Zucarelli et al. (2006) avaliaram o efeito de diferentes níveis de fósforo, nos componentes de produção, na produtividade e na qualidade fisiológica em sementes de feijão e verificaram que com a adição de  $150 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$  foi obtido um aumento no número de vagens e de sementes/planta, já os demais componentes de produção e a produtividade de sementes não foram influenciados pela aplicação do adubo fosfatado.

## **2.5 Função de resposta**

De acordo com Frizzone (1993), função de resposta ou de produção das culturas é uma relação física entre as quantidades de certo conjunto de insumos e as quantidades físicas máximas que podem ser obtidas do produto, para dada tecnologia conhecida. Assim, ao se supor que a função de resposta representa o máximo que se pode obter com o uso de cada combinação de insumos, está se definindo uma relação funcional entre os insumos e o produto.

Para se obter uma função de produção deve ser realizada uma análise de regressão entre uma ou mais variáveis independentes e uma variável dependente, segundo um modelo estatístico que possa representar esta relação (FRIZZONE, 1986).

A otimização no manejo da irrigação requer um conhecimento das funções de produção e do consumo de água, mediante as quais o rendimento (Y) se relaciona com alguma medida do uso da água (W), por parte do cultivo (MARTIN; VALERO, 1993).

A água e os nutrientes, dentre os fatores complementares de produção, são os que com maior frequência restringem os rendimentos. Sendo assim, o domínio da água como da fertilidade do solo estabelecem o critério principal para o êxito da agricultura. A utilização das funções de resposta permite descobrir soluções viáveis na otimização destes fatores na agricultura (FRIZZONE; PEREIRA, 1987).

Segundo Almeida (1987), o conhecimento da função de produção da água é básica para o planejamento de seu uso na determinação do impacto econômico, nas decisões alternativas, a curto e longo prazo. Em condições de agricultura irrigada é importante o conhecimento da resposta da planta ao suprimento hídrico.

Existem diferentes aplicações das funções de produção, tais como para determinar a relação entre a quantidade de água aplicada e os benefícios resultantes, na previsão de safra e estudar como diferentes ambientes podem alterar a produção das culturas.

Aguiar (1989), em estudos baseados nas produtividades médias de caupi, obtidas através em função das lâminas totais de água aplicada, verificou que a irrigação provocou aumento na produtividade dos grãos, conforme relação quadrática.

Objetivando a estimativa de uma função de produção do melão aos níveis de água e ao nitrogênio, no Vale do Curu, Ceará, utilizando irrigação por sulcos, Barros (1999) verificou que o modelo que melhor representou a variação do rendimento da cultura em função das lâminas de água e doses de nitrogênio foi o modelo polinomial de segundo grau, sem interação entre os fatores água e nitrogênio.

Mousinho (2002) analisando a cultura da melancia para as condições edafoclimáticas de Fortaleza, Ceará, utilizando irrigação por gotejamento. Obteve uma função de resposta da cultura à aplicação de níveis de água e nitrogênio, um comportamento quadrático da produtividade em relação aos fatores estudados, obtendo uma máxima produtividade de  $30806 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ , a ser obtido com a aplicação de  $693,5 \text{ mm}$  de água e  $222,1 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  de nitrogênio.

Monteiro (2004) trabalhando com a cultura do meloeiro, com o objetivo de obter uma função de resposta para a cultura aos níveis de água e adubação nitrogenada, no Vale do

Curu, Ceará. Através da função de produção ajustada, estimou um rendimento máximo de 25496,1 kg.ha<sup>-1</sup>, a ser obtido com o emprego de 612,1 mm de água e 224,4 kg.ha<sup>-1</sup> de nitrogênio.

Com o objetivo de se obter uma função de resposta do capim tanzânia aos níveis de água e adubação nitrogenada no Vale do Curu, CE, Ribeiro (2006) constatou que a eficiência do uso de nitrogênio em relação às lâminas aplicadas apresentou comportamento quadrático.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Caracterização da área do experimento

A pesquisa foi conduzida no período de 13 de setembro de 2007 a 13 de março de 2008 em uma área de 24,0 m x 41,0 m (Figura 1) no setor irrigado da Fazenda Experimental Vale do Curu, pertencente ao Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Ceará, localizada no município de Pentecoste, Ceará, distando 110,0 km de Fortaleza com altitude de 47 metros, entre os paralelos 3° 45' e 4° 00' de latitude Sul e os meridianos 39° 15' e 39° 30' de longitude Oeste.

O clima da região é do tipo AW', tropical chuvoso, segundo a classificação de Köppen, com precipitação média anual de 806,5 mm distribuída entre os meses de janeiro a abril, umidade relativa do ar média de 73,8% e temperatura média de 28,0°C.

O solo da área do experimento foi classificado como NEOSSOLO FLÚVICO apresentando relevo tipicamente plano. Atributos físicos e químicos na camada de 0 a 0,30 m estão apresentadas nas Tabelas 1 e 2, respectivamente. Trata-se de um solo com média capacidade de retenção de água, sem problemas de salinidade e sodicidade, com pH praticamente neutro.



Figura 1 - Vista da área do experimento.



Tabela 1 -. Atributos físicos e químicos do solo da área do experimento

| Composição Granulométrica (%) |                  |                |                 | Classe Textural                  | Densidade do solo (kg.m <sup>-3</sup> ) | pH   | CE (dS/m) | CC (%) | PMP (%) |
|-------------------------------|------------------|----------------|-----------------|----------------------------------|---|------|-----------|--------|---------|
| Areia Grossa                  | Areia Fina       | Silte          | Argila          |                                  |   |      |           |        |         |
| 18                            | 55               | 21             | 6               | Franco arenoso                   | 1400                                    | 6,8  | 0,72      | 11,2   | 4,4     |
| Complexo Sortivo (mE/100g)    |                  |                |                 |                                  |   |      |           |        |         |
| Ca <sup>2+</sup>              | Mg <sup>2+</sup> | K <sup>+</sup> | Na <sup>+</sup> | H <sup>+</sup> +Al <sup>3+</sup> | Al <sup>3+</sup>                        | S    | T         |        |         |
| 4,80                          | 2,70             | 0,53           | 0,21            | 0,50                             | 0,00                                    | 8,20 | 8,70      |        |         |

Tabela 2 - Características de fertilidade do solo da área do experimento

| Fósforo (mg. dm <sup>-3</sup> )           | Potássio (mg. dm <sup>-3</sup> )          | Ca + Mg (cmol <sub>c</sub> . dm <sup>-3</sup> ) | Ca (cmol <sub>c</sub> . dm <sup>-3</sup> ) |
|---|---|---|--|
| 140                                       | 347                                       | 9,9   | 5,8  |
| Mg (cmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup> ) | Al (cmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup> ) | Sódio (mg. dm <sup>-3</sup> )                   | pH   |
| 4,1                                       | 0,0                                       | 34  | 6,6  |

### 3.2 Instalação e manejo da cultura

O solo foi preparado com roçagem e gradagem, e conforme o resultado da análise do solo, não foi necessário realizar calagem para correção de pH.

A cultura utilizada foi a leguminosa forrageira cunhã (*Clitoria ternatea*, L.) irrigada através do sistema de aspersão convencional. A semeadura ocorreu manualmente (Figura 2) em linha corrida a uma profundidade média de 0,03 m e espaçamento entre linhas de 0,40 m em 18 de setembro de 2007 com sementes certificadas. A quebra de dormência da

semente foi efetuada com imersão em água morna, por um período aproximadamente 3 min até a água atingisse temperatura ambiente, 12 horas antes da semeadura.



Figura 2 - Semeadura manual da cunhã

No decorrer do ciclo da cultura foram efetuados arranquio manual de plantas invasoras, tratamento fitossanitário utilizando inseticida para controle do ataque de lagartas e três capinas manuais visando o controle de plantas invasoras, e portanto, a concorrência com a cultura por água e nutrientes.

Aos trinta dias após a semeadura realizou-se a primeira adubação fosfatada com fonte contendo 20% de  $P_2O_5$  em conformidade com os tratamentos:  $T_1$  - 0%;  $T_2$  - 50%;  $T_3$  - 100% e  $T_4$  - 150% da necessidade média, em única aplicação. O potássio foi fracionado em três aplicações, aos trinta, sessenta e noventa dias após a semeadura. Não se utilizou fonte de nitrogênio no experimento por se tratar de uma leguminosa.

### 3.3 Sistema e manejo da irrigação

Para obtenção de lâminas de água diferenciadas utilizou-se um sistema de aspersão em linha – “Line Source Sprinkler System” (Figuras 3 e 4), de acordo com metodologia desenvolvida por Hanks et al. (1976).



Figura 3 - Detalhe do aspersor



Figura 4 - Linha de aspersores

A qualidade da água para irrigação apresentava alto risco de salinidade ( $C_3$ ), porém, sem risco de sodificação ( $S_1$ ), conforme Richards (1954).

O turno de rega estabelecido teve como referência a disponibilidade real de água considerando a capacidade de água disponível e o fator de esgotamento ( $F$ ), este sendo de 50%. A frequência de irrigação teve um intervalo médio de cinco dias.

No centro de cada subparcela instalou-se um coletor a uma altura de 0,80 m do solo para mensurar a água aplicada na irrigação ao término de cada irrigação. O horário de irrigação ocorria sempre entre 0 h e 6 h, como forma de minimizar os efeitos de deriva pelo vento.

### 3.4 Delineamento experimental

O delineamento experimental foi em blocos ao acaso com parcelas subdivididas, composto de quatro blocos, quatro tratamentos primários compreendidos nas parcelas e quatro tratamentos secundários nas subparcelas, com dimensões de 3,0 x 20,0 m na parcela e 3,0 x 5,0 m na subparcela, conforme croqui ilustrado na Figura 5.

Os tratamentos compuseram-se da combinação de quatro lâminas de irrigação e quatro níveis de adubação fosfatada. As lâminas de irrigação  $W_1$ ,  $W_2$ ,  $W_3$  e  $W_4$ , corresponderam respectivamente, a 615,2, 605,1, 540,6 e 365,6 mm e os níveis de fósforo a 0, 150, 300 e 450  $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$ , respectivamente.

Na Tabela 3 apresenta-se o esquema da análise de variância associada ao delineamento experimental.

Tabela 3 - Esquema da análise de variância associado ao delineamento experimental.

| Causa da Variação    | G.L.       | Soma de Quadrados | Quadrado Médio | F | Prob>F |
|----------------------|------------|-------------------|----------------|---|--------|
| Lâminas (W)          | W – 1      |                   |                |   |        |
| Blocos               | J – 1      |                   |                |   |        |
| Resíduo (A)          | (W-1)(J-1) |                   |                |   |        |
| Parcelas             | WJ-1       |                   |                |   |        |
| Níveis de Fósforo(P) | P-1        |                   |                |   |        |
| W x P                | (W-1)(P-1) |                   |                |   |        |
| Resíduo(B)           |            |                   |                |   |        |
| Total                | WJP-1      |                   |                |   |        |

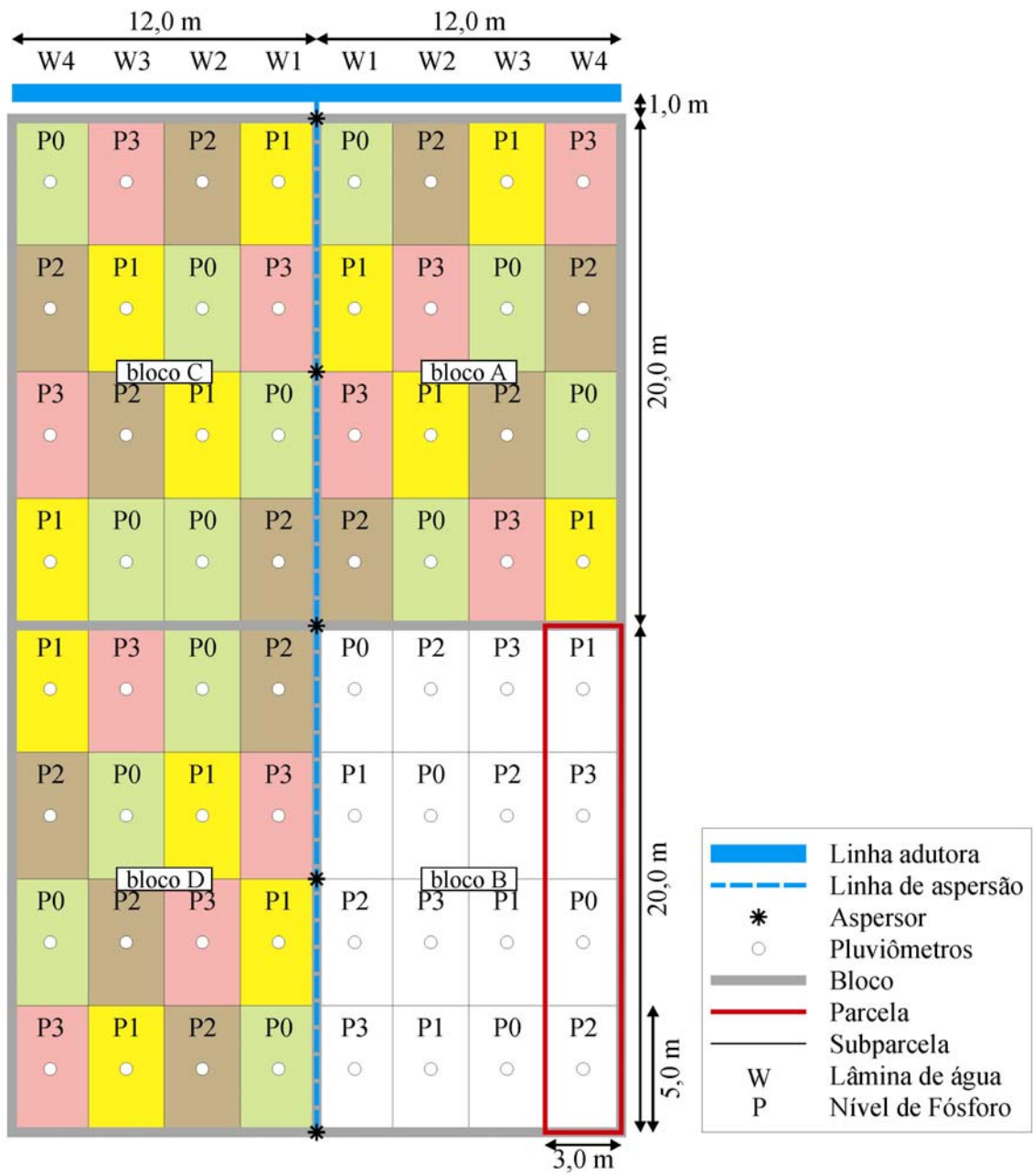


Figura 5 - Croqui do experimento ilustrando a distribuição de parcelas e subparcelas

### 3.5 Produção de forragem

Fundamentados em resultados obtidos por Viana (1983), a forrageira apresentou crescimento livre até o 90º dia após a semeadura, quando foi efetuado, manualmente, o corte de uniformização numa altura aproximada de 0,10 m do solo. As amostras foram coletadas numa área de 0,5 x 0,5 m, delimitadas por um quadrado (Figura 6), sendo este lançado aleatoriamente em cada subparcela, em três repetições, obtendo-se uma área de 0,75 m<sup>2</sup> de cada subparcela. Este material foi identificado e em seguida medida sua massa verde para posterior cálculo de produtividade (Figura 7).



Figura 6 - Quadro coletor de material



Figura 7 - Pesagem de massa verde

Conforme recomendações de Gadelha et al. (1982), o primeiro corte foi realizado 42 dias após o corte de uniformização, intervalo de tempo recomendado para os cortes posteriores. O procedimento foi o de se coletar em cada uma das subparcelas uma amostra da fitomassa contida em uma moldura de madeira de  $0,25 \text{ m}^2$  lançada aleatoriamente, duas vezes, em cada subparcela, correspondendo uma área de  $0,5 \text{ m}^2$ . O material foi identificado e em seguida medida sua massa verde para posterior cálculo de produtividade.

### 3.6 Função de produção

Neste experimento, os fatores de produção água (W) e fósforo (P) constituíram-se nas variáveis independentes e a produtividade da cultura (Y) na variável dependente. Para obtenção da função de produção foram testados dez modelos estatísticos que, de acordo com Aguiar (1989), mostram-se bastante satisfatórios para representar uma função de produção de uma cultura. Dentre estes modelos, testados a partir de análise de regressão utilizando-se o software SAS SYSTEM optou-se por aquele que melhor se ajustou aos dados do experimento, tendo em vista os coeficientes de determinação  $r^2$  e  $r^2$  ajustado, o valor do teste F da análise de

variância, os valores do teste t para todos os coeficientes, os sinais das variáveis dos modelos analisados e aspectos relacionados ao comportamento físico do processo. Os modelos estatísticos testados foram:

$$\hat{Y} = b_0 + b_1W + b_2N + b_3W^{0,5} + b_4N^{0,5} + b_5W^{0,5}N^{0,5} + e_i \quad (01)$$

$$\hat{Y} = b_0 + b_1W + b_2N + b_3W^{0,5} + b_4N^{0,5} + b_5WN + e_i \quad (02)$$

$$\hat{Y} = b_0 + b_1W + b_2N + b_3W^{0,5} + b_4N^{0,5} + e_i \quad (03)$$

$$\hat{Y} = b_0 + b_1W + b_2N + b_3W^2 + b_4N^2 + b_5WN + e_i \quad (04)$$

$$\hat{Y} = b_0 + b_1W + b_2N + b_3W^2 + b_4N^2 + e_i \quad (05)$$

$$\hat{Y} = b_0 + b_1W + b_2N + b_3W^{1,5} - b_4N^{1,5} + b_5WN + e_i \quad (06)$$

$$\hat{Y} = b_0 + b_1W + b_2N - b_3W^{1,5} - b_4N^{1,5} + e_i \quad (07)$$

$$\hat{Y} = b_0 + b_1W - b_2W^2 - b_3N^2 + e_i \quad (08)$$

$$\hat{Y} = b_1W + b_2N - b_3W^2 - b_4N^2 + b_5WN + e_i \quad (09)$$

$$\hat{Y} = b_1W + b_2N - b_3W^2 - b_4N^2 + e_i \quad (10)$$

### 3.7 Isoquantas

As isoquantas correspondem às curvas que apresentam uma mesma produtividade, que ligam pontos de diferentes combinações de lâminas de água e níveis de fósforo.

A partir da função de produção determinaram-se as isoquantas ou curvas de isoproducto, conforme dados obtidos de lâminas de água e dos níveis de fósforo, em função das produtividades previamente fixadas, em um gráfico de duas dimensões.



### 3.8 Produto físico marginal da água e do fósforo

O produto físico marginal de um determinado fator representa o incremento na produtividade ao se adicionar uma unidade a mais do fator considerado. O mesmo é obtido através da derivada primeira da função de produção em relação ao fator considerado, sendo representado pela equação geral:

$$PMg(f) = \frac{\partial Y}{\partial f} \quad (11)$$

sendo:

$PMg(f)$ : produto físico marginal do fator considerado;

$\frac{\partial Y}{\partial f}$ : derivada da função em relação ao fator considerado.

Para fins de análise foram obtidos os seguintes produtos marginais:

- Produtos físicos marginais da água para as diferentes lâminas aplicadas correspondentes a cada nível de fósforo;
- Produtos físicos marginais do fósforo para os diferentes níveis de fósforo aplicados correspondentes a cada lâmina de água.

### 3.9 Taxa marginal de substituição

A taxa marginal de substituição do fator lâmina de água pelo fator nível de fósforo aplicado ( $TMS_{W/P}$ ), que corresponde à quantidade do fator água que se dispõe a abandonar para se utilizar uma unidade a mais do fator fósforo, mantendo-se o mesmo nível de produtividade, foi obtida pela relação entre o produto físico marginal do fósforo e o produto físico marginal da água, sendo representada pela equação:

$$\text{TMS}_{W/P} = - \frac{\text{PMg P}}{\text{PMg W}} \quad (12)$$

Sendo:

$\text{TMS}_{W/P}$  = taxa marginal de substituição do fator água (W) pelo fator fósforo (P);

PMg W = produto marginal do fator água;

PMg P = produto marginal do fator fósforo.

### **3.10 Produtividade da água**

A produtividade da água foi calculada pela relação entre a produtividade de massa verde por unidade de volume de água, expressa em  $\text{kg.m}^{-3}$  ou alternativamente, em  $\text{R}\$.m^{-3}$  (PLAYÁN;MATEOS, 2006).

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Produtividade da cunhã em função das lâminas de água e dos níveis de fósforo.

Os valores médios de produtividade da cunhã em função dos tratamentos lâminas de água e níveis de fósforo, obtidos a partir do Anexo 1, são apresentados na Tabela 4.

A máxima produtividade média observada foi de 77598,3 kg.ha<sup>-1</sup>, obtido no tratamento W<sub>1</sub>P<sub>0</sub>, equivalente a 615,2 mm de água e 0 kg.ha<sup>-1</sup> de fósforo aplicado. Já a menor produtividade, 54265,0 kg.ha<sup>-1</sup>, foi observada no tratamento W<sub>4</sub>P<sub>0</sub>, equivalente a uma lâmina de água de 365,6 mm e 0 kg.ha<sup>-1</sup> de fósforo aplicado. Estes resultados demonstram que o fator de produção água é limitante à produção da cunhã, o mesmo não acontecendo com o fator de produção fósforo.

Aragão Júnior et al. (1989) estudando o efeito de lâminas de água em irrigação por sulcos, baseadas na evapotranspiração potencial, obteve no corte de uniformização da cultura da cunhã, aos 63 dias, um rendimento máximo de 7218,7 kg.ha<sup>-1</sup> de massa verde com uma lâmina média de 592,5 mm. Na presente pesquisa foi obtida no corte de uniformização uma produtividade máxima de 33533,3 kg.ha<sup>-1</sup> de massa verde, portanto superior em 364,5%, comparativamente à produtividade obtida por ARAGÃO JÚNIOR et al. (1989).

Tabela 4 - Produtividade média da cunhã, em kg.ha<sup>-1</sup>, em função das lâminas de água, em mm, e dos níveis de fósforo, em kg.ha<sup>-1</sup>.

| Lâminas<br>(mm) | Níveis de Fósforo (kg.ha <sup>-1</sup> ) |                |                |                | Médias  |         |
|-----------------|--|----------------|----------------|----------------|---------|---------|
|                 | P <sub>0</sub>                           | P <sub>1</sub> | P <sub>2</sub> | P <sub>3</sub> |         |         |
|                 | 0.0                                      | 150.0          | 300.0          | 450.0          |         |         |
| W <sub>1</sub>  | 615.2                                    | 77598,3        | 66105,0        | 74641,7        | 73566,7 | 72977,9 |
| W <sub>2</sub>  | 605.1                                    | 68433,3        | 75101,7        | 72596,7        | 67150,0 | 70820,4 |
| W <sub>3</sub>  | 540.6                                    | 67860,0        | 71485,0        | 68925,0        | 68671,7 | 69235,4 |
| W <sub>4</sub>  | 365.6                                    | 54265,0        | 62593,3        | 62061,7        | 61606,7 | 60131,7 |
| Médias          |  | 67039.2        | 68821.3        | 69556,3        | 67748,8 |         |

Fonte: O autor (2008).

O resumo da análise de variância da produtividade da cunhã, em  $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  está apresentado na Tabela 5. A análise mostrou que o fator de produção água influenciou significativamente na produtividade de massa verde da cunhã, em nível de significância de 1,3%. No entanto, o fator de produção fósforo e a interação entre os dois fatores não apresentaram diferença significativa entre os tratamentos em nível de 5% de probabilidade.

As análises das regressões demonstraram efeito significativo em nível de 0,217% para o modelo linear associada ao fator lâminas de água, porém, não significativo em nível de 5% para níveis de fósforo. A não interação entre os fatores água e fósforo pode sugerir a suposição de independência destes fatores.

Tabela 5 - Resumo da análise de variância da produtividade da cunhã em função da lâmina de água e dos níveis de fósforo.

| Variável<br>Analisada  | Prob. > F          |                     |                         |                               |                     |                         |   |
|------------------------|--------------------|---------------------|-------------------------|-------------------------------|---------------------|-------------------------|---|
|                        | Lâminas<br>de água | Regressão<br>linear | Regressão<br>quadrática | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | Regressão<br>linear | Regressão<br>quadrática | Água x<br>P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> |
| Massa<br>verde<br>(MV) | 0,01309*           | 0,00217*            | 0,85968                 | 0,73824                       | 0,71120             | 0,30113                 | 0,20893                                 |

Fonte: O autor (2008)

Ao analisar o efeito das lâminas de água sobre a produtividade da cunhã, através da análise de regressão, constatou-se que o modelo linear apresentou efeito altamente significativo ( $\text{Prob.}>F=0,00217$ ) e coeficiente de determinação de 0,9818 (Figura 8). Aragão Júnior et al. (1989) concluíram que os dados de produtividade de massa verde evidenciaram a relação de linearidade existente entre o suprimento hídrico e o desenvolvimento vegetativo da cunhã.

O efeito dos níveis de fósforo sobre a produtividade média da cunhã (Figura 9) apresentou uma produtividade máxima estimada de  $69489,8 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ , obtido com a aplicação de  $254,5 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  de fósforo. Embora o modelo quadrático não tenha sido significativo em nível de 5%, há de se considerar que o mesmo explica muito bem as relações de rendimento em função do insumo, tendo em vista aspectos biológicos do processo. Ademais apresentou uma elevada relação entre a produtividade de massa verde e os níveis de fósforo aplicados, além de coerência quanto ao teste dos sinais nos termos linear e quadrático.

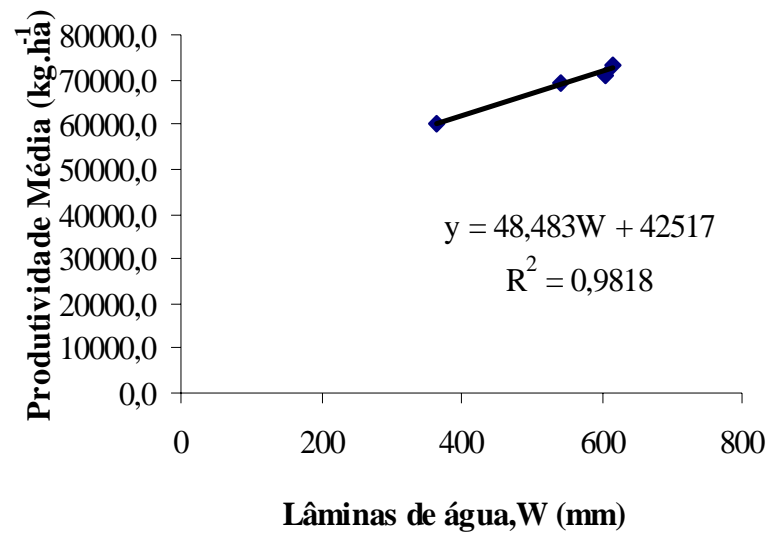


Figura 8 - Curva da produtividade média da cunhã em função das lâminas de água

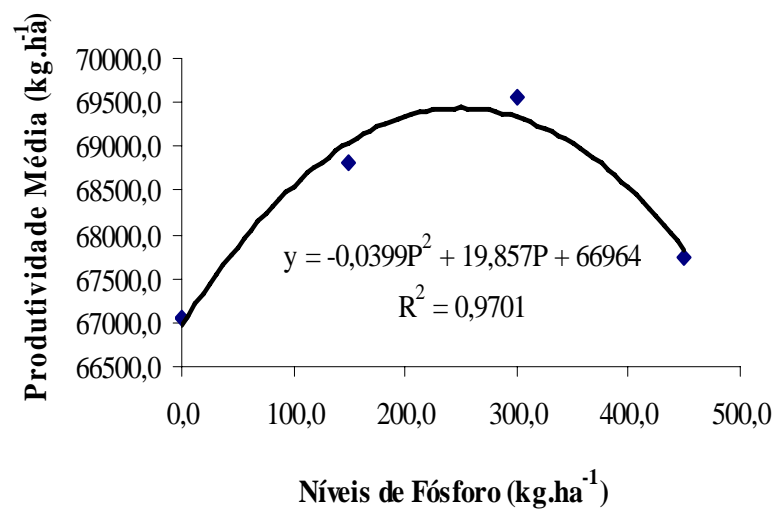


Figura 9 - Curva da produtividade média da cunhã em função dos níveis de fósforo

#### 4.2 Lâmina de água economicamente ótima

De acordo com a análise de variância e de regressão, o efeito das lâminas totais de água sobre a produtividade da cunhã foi melhor explicado pelo modelo linear, tendo em vista que apesar de obter um coeficiente de determinação (0,9818) inferior ao obtido no modelo quadrático (0,9834), o comportamento da produtividade em função das lâminas de água é

explicado pelo modelo linear em nível de significância de 0,217% contra 85,97% do modelo quadrático. Portanto, adotou-se nesta análise o modelo linear para explicar a variação da produtividade da cunhã em função das lâminas de água, não possibilitando assim se estimar a lâmina de água economicamente ótima, para cada nível de fósforo aplicado.

### 4.3 Nível de fósforo economicamente ótimo

Na Tabela 6 estão apresentadas às equações melhor ajustadas no modelo polinomial de segundo grau, que expressam o comportamento da produtividade da cunhã em função dos níveis de fósforo, para cada lâmina total de água. As referidas equações foram obtidas através de uma análise de regressão e têm como variável independente o nível de fósforo aplicado (P), em  $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ , e como variável dependente a produtividade da cunhã (Y), em  $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ . A maior lâmina de água aplicada, 615,2 mm não obteve na equação ajustada do modelo polinomial de segundo grau, um ponto de máxima, com isso tornou-se impraticável estimar o nível de fósforo economicamente ótimo.

Tabela 6 - Equações ajustadas da produtividade da cunhã em função dos níveis de fósforo, para cada lâmina de água.

| Lâmina de água<br>(mm) | Equação ajustada                   | Coefficiente de determinação<br>( $r^2$ ) |
|------------------------|------------------------------------|---|
| 365,6                  | $Y = -0,097 P^2 + 58,24 P + 54712$ | 0,913                                     |
| 540,6                  | $Y = -0,043 P^2 + 19,30 P + 68285$ | 0,510                                     |
| 605,2                  | $Y = -0,134 P^2 + 56,33 P + 68745$ | 0,952                                     |

Fonte: O autor (2008)

As equações dos produtos físicos marginais do fósforo para as lâminas de água de 365,6; 540,6 e 605,2 mm, respectivamente, foram obtidos derivando-se as equações da produtividade (Y) em função dos níveis de fósforo, para cada nível desse fator, conforme as equações 14, 15 e 16, abaixo relacionadas:

$$\frac{dY}{dP} = -0,194P + 58,24 = \frac{P_P}{P_Y} \quad (14)$$

$$\frac{dY}{dP} = -0,086P + 19,30 = \frac{P_P}{P_Y} \quad (15)$$

$$\frac{dY}{dP} = -0,268P + 56,33 = \frac{P_P}{P_Y} \quad (16)$$

A partir destas equações, obtiveram-se os produtos físicos marginais do fósforo para cada uma das lâminas de água aplicada (Tabela 7). Observa-se que os produtos marginais de P foram maiores para os menores níveis de P aplicado, e à medida que estes níveis de P aumentaram os produtos marginais diminuíram até chegar a zero, onde ocorre a máxima produtividade. A partir daí os produtos marginais tornaram-se negativos, indicando ser anti-econômico o uso do nível de fósforo de 300 e 450 kg.ha<sup>-1</sup>, com exceção da lâmina 365,6 mm. Esta variação do produto marginal do fósforo mostra que o incremento da produtividade da cunhã decresce com o aumento dos níveis de P até chegar um ponto de não variar com o aumento dos níveis de P e decrescer com a contínua aplicação deste fator de produção, tornando-se anti-econômico.

Tabela 7 - Produto físico marginal do fósforo para os diferentes níveis de fósforo, correspondentes cada lâmina total de água.

| Níveis de fósforo<br>(kg.ha <sup>-1</sup> ) | Lâminas de água (mm) |                |                |
|---|----------------------|----------------|----------------|
|   | W <sub>2</sub>       | W <sub>3</sub> | W <sub>4</sub> |
|   | 605,2                | 540,6          | 365,6          |
| 0   | 56,33                | 19,30          | 58,24          |
| 150   | 16,13                | 6,40           | 29,14          |
| 300   | -24,07               | -6,50          | 0,04           |
| 450   | -64,27               | -19,40         | -29,06         |

Fonte: O autor (2008).

Os valores máximos de produtividades físicas, para todas as lâminas de água aplicadas, ocorreram com a aplicação do nível de fósforo acima de 150 kg.ha<sup>-1</sup>. Para a lâmina de água de 365,6 mm, sendo esta a menor lâmina de água aplicada, a produtividade máxima estimada seria alcançada com a aplicação de 300,21 kg.ha<sup>-1</sup> de fósforo.

O nível de fósforo economicamente ótimo foi aquele que conduziu a uma produtividade que proporcionou a máxima receita líquida para cada lâmina total de água aplicada, e é aquela que satisfaz a condição de que o produto físico marginal do fósforo se iguale ao quociente entre o preço do fósforo ( $P_P$ ) e o preço do produto ( $P_Y$ ). No presente trabalho considerou-se o quilo de massa verde da cunhã de R\$ 0,50 e o preço do fósforo 8,00 R\$.kg<sup>-1</sup>, sendo o produto comercial utilizado o superfosfato simples.

Devido à grande variação do valor desta relação, em função da variação no preço do adubo fosfatado e da massa verde da cunhã, foram determinados os níveis de fósforo economicamente ótimos considerando diferentes valores de  $P_P/P_Y$ , conforme ilustra a Tabela 8.

Tabela 8 - Níveis de fósforo economicamente ótimos em função da relação entre os preços do fósforo ( $P_P$ ) e da cunhã ( $P_Y$ ).

| $P_P / P_Y$ | Lâminas de água (mm) |          |          |
|-------------|----------------------|----------|----------|
|             | 365,6                | 540,6    | 605,2    |
| 1           | 295,0515             | 212,7907 | 206,4552 |
| 2           | 289,8969             | 201,1628 | 202,7239 |
| 4           | 279,5876             | 177,9070 | 195,2612 |
| 8           | 258,9691             | 131,3953 | 180,3358 |
| 16          | 217,7320             | 38,3721  | 150,4851 |

Fonte: O autor (2008).

Observa-se na Figura 10 que houve variação no nível de fósforo economicamente ótimo com a variação da relação  $P_P/P_Y$ , para todas as lâminas de água, indicando que estas relações dependem dos preços do fósforo e da cunhã.

Os menores níveis ótimos de fósforo ocorreram para a lâmina de água 540,6 mm. Já os maiores níveis ótimos de fósforo ocorreram com a aplicação da lâmina de 365,6 mm.



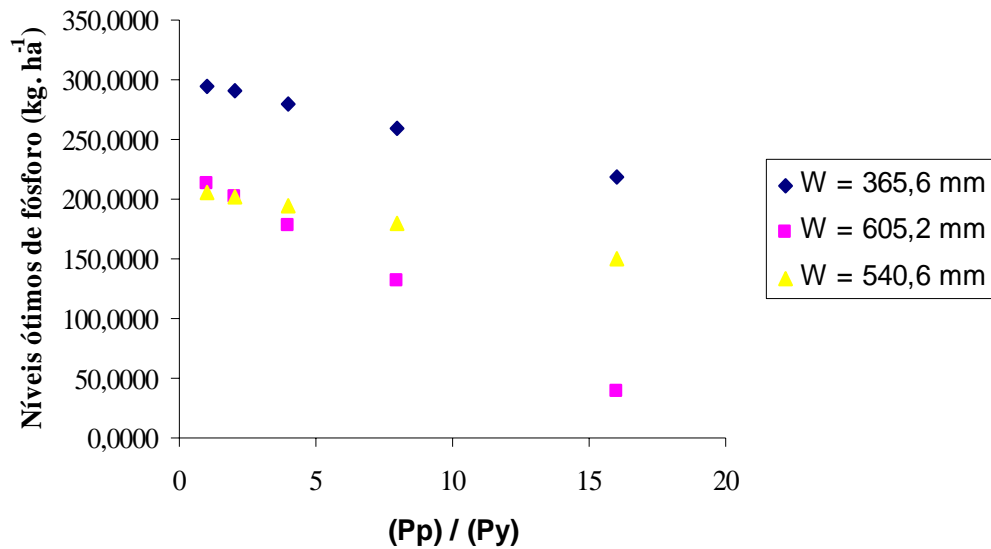


Figura 10 - Níveis de fósforo economicamente ótimos em função da relação entre o preço do fósforo e o preço da cunhã.

#### 4.4 Superfície de resposta

Na Tabela 9 é apresentado o resumo da análise de regressão múltipla, para os dez modelos estatísticos testados da produtividade da cunhã em função das diferentes lâminas de água (W) e níveis de fósforo (P).

Objetivando-se obter a função de produção verificou-se que todos os modelos foram significativos pelo teste F ao nível de 1% de probabilidade, demonstrando que seria possível adotar qualquer um dos modelos para representar a variação da produtividade da cunhã em função das lâminas de água e diferentes níveis de fósforo. No entanto para a condição estudada, o modelo que melhor se ajustou aos dados do experimento foi o modelo de nº 9, do tipo polinomial quadrático, sem intercepto, conforme a equação a seguir:

$$Y = 202,89 W + 61,57 P - 0,14 W^2 - 0,04 P^2 - 0,078 WP$$

Para este modelo o coeficiente de determinação ( $r^2$ ) de 0,9981, considerado alto, significando que 99,81% da variação da produtividade da cunhã é explicado pela variação das lâminas de água e dos níveis de fósforo.

Tabela 9 – Análise de regressão múltipla da produtividade da cunhã (Y) em função de diferentes lâminas totais de água (W) e níveis de fósforo (P), para dez modelos matemáticos.

| Modelos | Parâmetros  |           |           |           |            |          |           | r <sup>2</sup> | r <sup>2</sup><br>ajust | F      | Prob>F  |
|---------|-------------|-----------|-----------|-----------|------------|----------|-----------|----------------|-------------------------|--------|---------|
|         | B0          | B1        | B2        | B3        | B4         | B5       |           |                |                         |        |         |
| 01      | Parâm. Est. | -18339    | -27,82550 | -14,86854 | 4363,72007 | 2216,189 | -80,63031 | 0,7711         | 0,6567                  | 6,74   | 0,0054  |
|         | Prob > t    | 0,9113    | 0,9361    | 0,4578    | 0,7743     | 0,0909   | 0,1277    |                |                         |        |         |
| 02      | Parâm. Est. | -3487,137 | -11,58499 | 23,50418  | 3340,09486 | 366,2583 | -0,07218  | 0,7507         | 0,6260                  | 6,02   | 0,0080  |
|         | Prob > t    | 0,9838    | 0,9745    | 0,5234    | 0,8332     | 0,4056   | 0,2199    |                |                         |        |         |
| 03      | Parâm. Est. | 5146,725  | -27,82550 | -14,86854 | 3340,09486 | 366,2583 | -----     | 0,7080         | 0,6018                  | 6,67   | 0,0056  |
|         | Prob > t    | 0,9767    | 0,9405    | 0,4883    | 0,8378     | 0,4180   | -----     |                |                         |        |         |
| 04      | Parâm. Est. | 24398     | 100,03774 | 58,22980  | -0,03628   | -0,03988 | -0,07218  | 0,7552         | 0,6329                  | 6,17   | 0,0073  |
|         | Prob > t    | 0,5503    | 0,5640    | 0,1251    | 0,8368     | 0,3507   | 0,2160    |                |                         |        |         |
| 05      | Parâm. Est. | 33032     | 83,79723  | 19,85709  | -0,03628   | -0,03988 | -----     | 0,7125         | 0,6080                  | 6,82   | 0,0052  |
|         | Prob > t    | 0,4289    | 0,6372    | 0,3368    | 0,8416     | 0,3638   | -----     |                |                         |        |         |
| 06      | Parâm. Est. | 21319     | 137,06625 | 69,95359  | -2,19187   | -1,39100 | -0,07218  | 0,7542         | 0,6314                  | 6,14   | 0,0075  |
|         | Prob > t    | 0,6973    | 0,6948    | 0,1342    | 0,8353     | 0,3619   | 0,2168    |                |                         |        |         |
| 07      | Parâm. Est. | 29953     | 120,82574 | 31,58087  | -2,19187   | -1,39100 | -----     | 0,7115         | 0,6067                  | 6,78   | 0,0053  |
|         | Prob > t    | 0,5942    | 0,7366    | 0,3532    | 0,8401     | 0,3749   | -----     |                |                         |        |         |
| 08      | Parâm. Est. | 34308     | 83,79723  | -----     | -0,03628   | 0,000640 | -----     | 0,6862         | 0,6077                  | 8,75   | 0,0024  |
|         | Prob > t    | 0,4103    | 0,6366    | -----     | 0,8413     | 0,9584   | -----     |                |                         |        |         |
| 09      | Parâm. Est. | -----     | 202,88888 | 61,57296  | -0,13992   | -0,04047 | -0,07778  | 0,9981         | 0,9973                  | 1182,3 | <0,0001 |
|         | Prob > t    | -----     | <0,0001   | 0,0922    | 0,0022     | 0,3285   | 0,1655    |                |                         |        |         |
| 10      | Parâm. Est. | -----     | 225,21993 | 20,37023  | -0,18056   | -0,04070 | -----     | 0,9978         | 0,9970                  | 1342,3 | <0,0001 |
|         | Prob > t    | -----     | <0,0001   | 0,3166    | <0,0001    | 0,3463   | -----     |                |                         |        |         |

Fonte: O autor (2008).

De acordo com o modelo escolhido a produtividade máxima estimada da cunhã seria de  $73726,7 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$ , a ser obtida com a aplicação de  $700,4 \text{ mm}$  de água e  $86,74 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$  de fósforo.

Na Figura 11 visualiza-se a representação gráfica da função de produção estimada. Evidencia-se que o fator lâminas totais de água foi mais limitante na produtividade da cultura do que o fator níveis de fósforo, fato este comprovado pela maior curvatura da linha do fator lâminas totais de água na superfície de resposta.

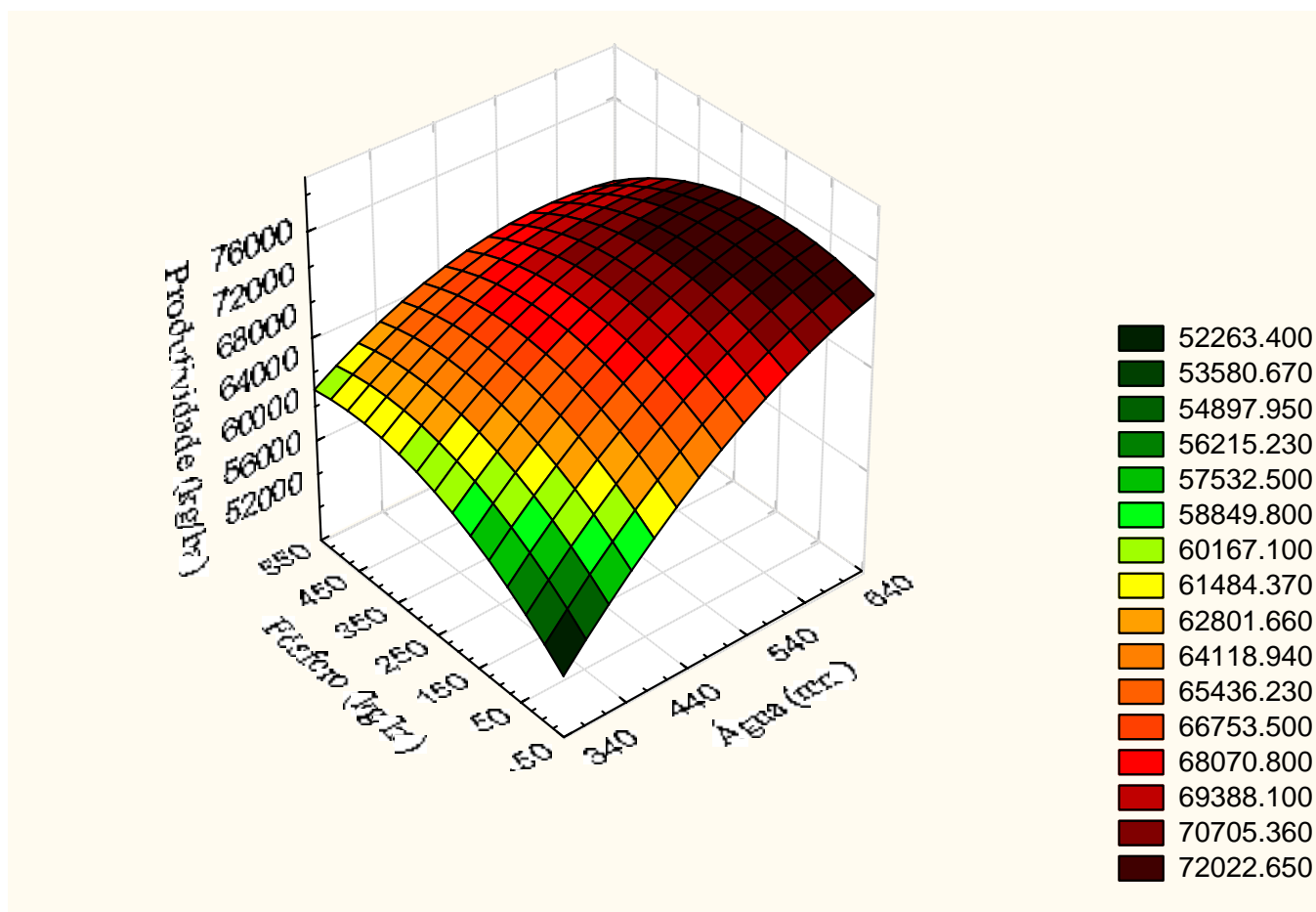


Figura 11 – Superfície de resposta da produtividade da cunhã em função das lâminas de água e dos níveis de fósforo.

#### 4.5 Isoquantas

As isoquantas, curvas de isoprodutos ou curvas de produtos constantes, mostradas na Figura 12, com equidistância entre curvas de  $6000 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ , foram obtidas a partir da função

de produção explicitando-se o fator água, em função da produtividade e do outro fator (nível de fósforo), previamente fixados.

As isoquantas demonstram as diferentes combinações de lâminas de água e níveis de fósforo que proporcionam um mesmo nível de produtividade. Quanto maior a produtividade, menor a quantidade de combinações dos fatores de produção analisados, até o ponto em que apenas uma combinação de W e P é possível, combinação esta que proporciona o máximo rendimento da cunhã. Observa-se que o fator água pode ser substituído pelo fator fósforo até um certo limite de modo a permitir a obtenção de uma mesma produtividade.

Observa-se, ainda, que as isoquantas são convexas à origem e que, segundo Leftwich (1976), isto se deve ao fato de que embora haja um certo grau de substituição entre os fatores água e fósforo, estes não são substitutos perfeitos.

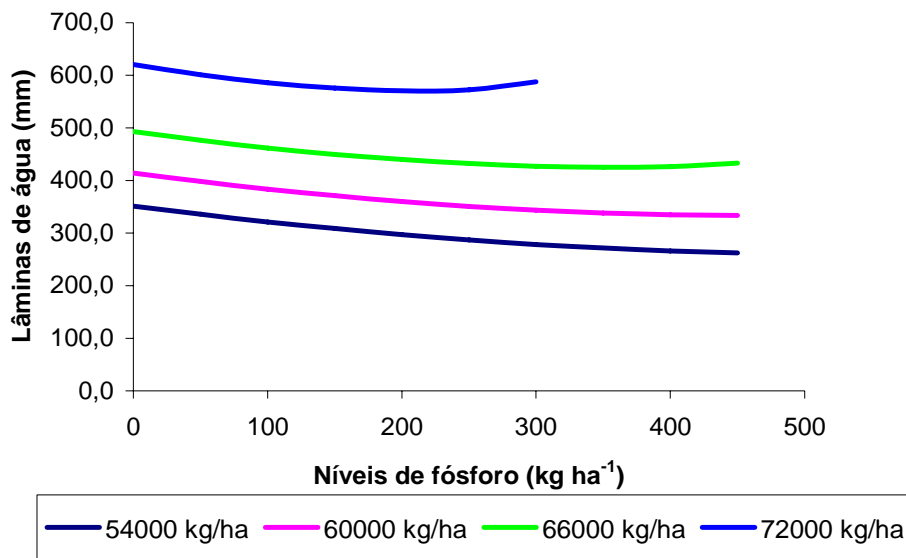


Figura 12 - Isoquantas ou curvas de isoprodutos para a produtividade da cunhã em função das lâminas de água e níveis de fósforo.

#### 4.6 Produtos físicos marginais da água e do fósforo

Os produtos físicos marginais da água e do fósforo, respectivamente, para as diferentes lâminas de água e níveis de fósforo, estão dispostos na Tabela 10. Estes valores foram obtidos derivando-se a equação da função de produção em relação à água e ao fósforo, respectivamente.

O produto marginal representa o incremento na produtividade ao se usar uma unidade a mais do fator considerado, água ou fósforo. Observa-se, por exemplo, que ao se utilizar 300 kg.ha<sup>-1</sup> de fósforo e 365,2 mm de água, a produtividade aumenta 77,1 kg.ha<sup>-1</sup> para cada milímetro de água aplicado e 9,1 kg.ha<sup>-1</sup> para cada kg de fósforo aplicado.

Os produtos marginais da água e do fósforo diminuem à medida que aumentam as lâminas de água e os níveis de fósforo. Ambos diminuem até atingir o valor zero, onde se dá a máxima produtividade. Nesta análise, o produto marginal da água é zero quando a lâmina aplicada for igual a 695,5 mm. Já o produto marginal do fósforo atinge o valor zero com a aplicação de 104,4 kg.ha<sup>-1</sup>.

A partir do momento em que o produto marginal da água e o produto marginal do fósforo tornam-se negativos, evidenciam-se a queda na produtividade com a respectiva aplicação de maiores lâminas de água e níveis de fósforo. A partir de então, tornam-se anti-econômicas as quantidades aplicadas dos dois fatores.

Tabela 10 - Produto físico marginal da água para as diferentes lâminas de água (valor superior) e produto físico marginal do fósforo para os diferentes níveis de fósforo.

| Lâminas totais de água (mm) | Níveis de fósforo (kg.ha <sup>-1</sup> ) |      |       |       |
|-----------------------------|--|------|-------|-------|
|                             | 0  | 150  | 300   | 450   |
| 365,6                       | 100,5                                    | 88,8 | 77,1  | 65,4  |
|                             | 33,1                                     | 21,1 | 9,1   | -2,9  |
| 540,6                       | 51,5                                     | 39,8 | 28,1  | 16,4  |
|                             | 19,4                                     | 7,4  | -4,6  | -16,6 |
| 605,1                       | 33,5                                     | 21,8 | 10,1  | -1,6  |
|                             | 14,4                                     | 2,4  | -9,6  | -21,6 |
| 615,2                       | 30,6                                     | 18,9 | 7,2   | -4,5  |
|                             | 13,6                                     | 1,6  | -10,4 | -22,4 |

Fonte: O autor (2008).

#### 4.7 Taxa marginal de substituição

Na Tabela 11 são apresentados os valores das taxas marginais de substituição ( $TMS_{W/P}$ ) de água por fósforo, ou melhor, a quantidade de água que deve substituir uma unidade do fator fósforo de modo a manter o mesmo nível de produtividade. Os valores da TMS foram obtidos para diferentes níveis de produtividade.

Quanto mais água e menos fósforo for usado para obtenção do mesmo nível de produtividade da cunhã, mais difícil se torna substituir fósforo por água. A declividade em cada ponto da curva de isoproducto corresponde à taxa marginal de substituição de água por fósforo.

A TMS, inicialmente, é negativa, indicando que a água está sendo substituída pelo fósforo em proporções decrescentes. A partir do momento em que ela se torna positiva, torna-se também antieconômica, uma vez que para um mesmo nível de produtividade, utilizam-se níveis crescentes dos fatores de produção.

A produtividade de  $54000 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  apresentou viabilidade econômica em todos os níveis de fósforo estudados. A partir do nível de fósforo  $450 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  torna-se anti-econômico para a produtividade de  $60000 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ .

No nível de P de  $50 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ , para uma produtividade  $72000 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  seria necessário empregar  $0,35 \text{ mm}$  de água para substituir cada  $\text{kg}$  de fósforo, de modo a manter o mesmo rendimento. Isto significa que para cada  $\text{kg}$  de P acrescentado, poder-se-ia economizar  $0,35 \text{ mm}$  de água. As combinações de quantidades de água e fósforo em que a TMS torna-se positiva demonstram que em vez de se economizar, passar-se-ia a gastar mais água a cada unidade de P acrescentada, tornando a atividade anti-econômica.

Tabela 11 - Taxas marginais de substituição ( $TMS_{W/P}$ ) da água por fósforo e as lâminas de água e níveis de fósforo, correspondentes a cada nível pré-fixado de nutriente.

| P<br>kg/ha) | 54000  |       | 60000  |       | 66000  |       | 72000  |       |
|-------------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|
|             | W (mm) | TMS   | W (mm) | TMS   | W (mm) | TMS   | W (mm) | TMS   |
| 0           | 351,3  | -0,33 | 414,0  | -0,34 | 493,0  | -0,36 | 620,8  | -0,45 |
| 50          | 335,7  | -0,30 | 398,0  | -0,30 | 476,3  | -0,31 | 600,9  | -0,35 |
| 100         | 321,4  | -0,27 | 383,7  | -0,27 | 461,9  | -0,27 | 585,9  | -0,25 |
| 150         | 308,6  | -0,24 | 371,0  | -0,24 | 449,7  | -0,22 | 575,6  | -0,16 |
| 200         | 297,1  | -0,22 | 360,1  | -0,20 | 439,7  | -0,18 | 570,6  | -0,04 |
| 250         | 287,1  | -0,19 | 350,8  | -0,17 | 432,2  | -0,13 | 572,6  | 0,13  |
| 300         | 278,5  | -0,16 | 343,4  | -0,13 | 427,2  | -0,07 | 587,5  | 0,55  |
| 350         | 271,5  | -0,12 | 337,9  | -0,09 | 425,2  | -0,01 | *      | *     |
| 400         | 266,1  | -0,09 | 334,6  | -0,04 | 426,7  | 0,07  | *      | *     |
| 450         | 262,5  | -0,05 | 333,6  | 0,01  | 432,8  | 0,18  | *      | *     |

Fonte: O autor (2008).

#### 4.8 Produtividade da água

Nas Tabelas 12 e 13 apresentam-se os valores médios de produtividade da água relacionada à cultura da cunhã em função das lâminas de água e dos níveis de fósforo, expressos em  $kg.m^{-3}$  e  $R\$.m^{-3}$ , respectivamente. Observa-se que os valores médios da produtividade da água não apresentaram alterações com os níveis de fósforo, bem como para os níveis de água para lâminas superiores a 540 mm, conforme demonstra a Figura 14.

Tabela 12 - Valores médios da produtividade da água ( $\text{kg}\cdot\text{m}^3$ ) em função das lâminas totais de água e dos níveis de fósforo.

| Lâminas (mm)   | Níveis de Fósforo ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) |                       |                       |                       | Médias |     |
|----------------|--|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--------|-----|
|                | P <sub>0</sub><br>0                                  | P <sub>1</sub><br>150 | P <sub>2</sub><br>300 | P <sub>3</sub><br>450 |        |     |
| W <sub>1</sub> | 615,2  | 4,1                   | 3,6                   | 4,0                   | 4,0    | 3,9 |
| W <sub>2</sub> | 605,1  | 3,9                   | 4,1                   | 4,0                   | 3,7    | 3,9 |
| W <sub>3</sub> | 540,6  | 3,6                   | 4,4                   | 4,2                   | 4,2    | 4,1 |
| W <sub>4</sub> | 365,6  | 5,6                   | 5,7                   | 5,7                   | 5,6    | 5,6 |
| Médias         |  | 4,3                   | 4,5                   | 4,5                   | 4,4    |     |

Fonte: O autor (2008).

Tabela 13 - Valores médios da produtividade da água em ( $\text{R}\$/\text{m}^3$ ) em função das lâminas totais de água e dos níveis de fósforo.

| Lâminas (mm)   | Níveis de Fósforo ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) |                       |                       |                       | Médias |     |
|----------------|--|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--------|-----|
|                | P <sub>0</sub><br>0                                  | P <sub>1</sub><br>150 | P <sub>2</sub><br>300 | P <sub>3</sub><br>450 |        |     |
| W <sub>1</sub> | 615,2  | 2,1                   | 1,8                   | 2,0                   | 2,0    | 2,0 |
| W <sub>2</sub> | 605,1  | 2,0                   | 2,1                   | 2,0                   | 1,8    | 2,0 |
| W <sub>3</sub> | 540,6  | 1,8                   | 2,2                   | 2,1                   | 2,1    | 2,1 |
| W <sub>4</sub> | 365,6  | 2,8                   | 2,9                   | 2,8                   | 2,8    | 2,8 |
| Médias         |  | 2,2                   | 2,2                   | 2,2                   | 2,2    |     |

Fonte: O autor (2008).

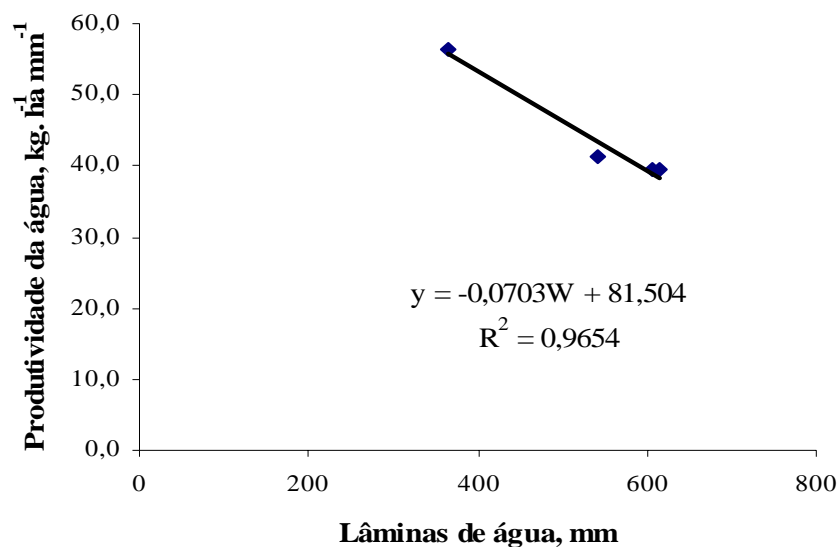


Figura 13 - Produtividade da água em função das lâminas de água.



## 5. CONCLUSÕES

- 1 O fator de produção fósforo não se mostrou limitante à produção de massa verde da cultura da cunhã;
- 2 A média capacidade de retenção de água do solo não permitiu queda da produtividade por excesso do fator água, e, portanto, a não identificação de uma região não racional ao uso deste fator;
- 3 A produtividade máxima estimada de massa verde de cunhã foi de  $73,7 \text{ ton.ha}^{-1}$ , obtida com uma lâmina de água de  $700,4 \text{ mm}$  e  $86,7 \text{ kg.ha}^{-1}$  de fósforo;
- 4 A produtividade da água não apresentou alteração com os níveis de fósforo, o mesmo ocorrendo com os níveis de água superiores a  $540 \text{ mm}$ ;
- 5 Independente dos níveis de fósforo aplicados, obteve-se uma produção média de  $4,5 \text{ kg}$  de massa verde de cunhã para cada tonelada de água aplicada.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACOSC – Associação dos criadores de ovinos e caprinos do sertão do Cabugi. Disponível em: <<http://www.acosc.org.br/acosc/infortecnicas>>. Acesso em: 18 jun. 2008.

AGUIAR, J. V., **Determinação do consumo de água e da função de produção do caupi irrigado no Município de Bragança – Pará**. Fortaleza, 1989. 106 p. Dissertação (Mestrado em irrigação e drenagem) Universidade Federal do Ceará.

ALMEIDA, E. V. **Determinação da função de produção do milho irrigado na baixada cuiabana**. Fortaleza: UFC/Curso de Pós – Graduação em Agronomia, Área de concentração em Irrigação e Drenagem, 1987. 83 p. (Monografia).

ARAGÃO JÚNIOR, T. C.; MAGALHÃES, C. A. de.; SANTOS, C. S. V. dos. Estudo de lâminas de irrigação na cultura da cunhã. Fortaleza, EPACE, 14p., 1989 (**Boletim Técnico**).

ARAÚJO FILHO, J.C. de; RIBEIRO, M.R. Infiltração de água em Cambissolos do Baixio de Irecê (BA). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.20, n.3, p.363-370, 1996.

BARBOSA, F. C.; TEIXEIRA, A. dos S. e GONDIM, R.S. Necessidades de irrigação das culturas na Bacia do Baixo Jaguaribe. In: ROSA, M.F. de.; GONDIM, R. S. e FIGUEIRÊDO, M.C.B. de. **Gestão sustentável no Baixo Jaguaribe**, Ceará. Fortaleza: 2006. p. 301-369.

BARROS, V.S.da. **Função de produção do melão (Cucumis melo L.) aos níveis de água e adubação nitrogenada no Vale do Curu – Ce**. Fortaleza: UFC, 1999. 76p. Dissertação de Mestrado em Irrigação e Drenagem.

BERNARDO, S. **Manual de irrigação**. 6.ed. Viçosa: UFV, Imprensa Universitária, 1997. 596p.

BERNARDO, S. **Manual de irrigação**. 8.ed. Viçosa: UFV, Imprensa Universitária, 2006. 596p.

CASTRO, O.M.; VIEIRA, S.R.; MARIA, I.C. Sistema de preparo do solo e disponibilidade de água. In: SIMPÓSIO SOBRE MANEJO DE ÁGUA NA AGRICULTURA, 1987, Campinas. **Anais**. Campinas: Fundação Cargill, 1987. p.27-51. DOORENBOS, J.; KASSAM, A.H. Yield response.

COELHO, E. F.; SILVA, J. G. F. da; ALVES, A. A. C.; CRUZ, J. L. Irrigação do mamoeiro. Cruz das Almas: Embrapa mandioca e fruticultura, jul. 2003. 8p. (Embrapa-CNPMF. Série **Circular Técnica**, 54).

COLARES, D.S. **Análise técnico-econômica do cultivo de arroz irrigado no Perímetro Irrigado Morada Nova, Ceará.** Fortaleza: UFC, 2004. 58p. Dissertação de Mestrado em Irrigação e Drenagem.

CORREIA, A.A.D. **Bioquímica nos solos, nas pastagens e forragens.** Fundação Calouste Gulbenkian, 1983. 789p.

CUNHA, F. F. da; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C., SEDIYAMA, G.C.; PEREIRA, O. G.; ABREU, F. V. S. de. Produtividade do capim tanzânia em diferentes níveis e frequências de irrigação. **Acta Sci. Agrônômica** Maringá, v. 30, n. 1, p. 103-108, 2008.

DA SILVA, S.C.; PEREIRA, C.G.S. Princípios de ecologia aplicados ao manejo da pastagem. In: SIMPÓSIO SOBRE ECOSSISTEMA DE PASTAGENS, 3., 1997, Jaboticabal. **Anais...** Jaboticabal: Fundação Universidade Estadual Paulista, 1997. p.1-62

DOORENBOS, J.; PRUITT, W.O. **Crop Water Requirements.** (FAO série Irrigation and Drainage Paper, 24). Rome: FAO, 1992. 144p.

FAO. **Crops and drops: making the best use of water for agriculture.** Roma, 2002. 22 p.

FICK, G.W.; HOLT, D.A.; LUGG, D.G. Environmental physiology and crop growth. In: HANSON, A.A.; BARNES, D.K.; HILL, R.R. (Eds.) **Alfalfa and alfalfa improvement.** Madison: ASA, CSSA, SSSA, 1988. p.163-194.

FOLEGATTI, M.V.; PAZ, V.P.S.; PEREIRA, A.S.; LIBARDI, V.C.M. Efeito de diferentes níveis de irrigação e de déficit hídrico na produção do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L). In: CONGRESSO CHILENO DE ENGENIERIA AGRÍCOLA, 2., 1997, Chillán. Disquete. Chillán, 1997.

FRIZZONE, J. A. & PEREIRA, G. T. Funções de resposta do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) ao uso de nitrogênio e lâmina de irrigação: I-região de produção racional. ABID, **Revista Irrigação e Tecnologia Moderna.** Nº28, P. 26-32. 1987.

FRIZZONE, J. A. **Funções de resposta das culturas à irrigação.** Piracicaba: ESALQ/USP. 1993. 42p. (Série Didática, 6).

FRIZZONE, J.A. **Irrigação por Superfície.** São Paulo: ESALQ/USP, 1993. 183p.

FRIZZONE, J.A. Programação matemática aplicada à projetos hidroagrícolas. In: XXIV CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, Viçosa, MG, n.3, 1995. 29p.

GADELHA, J.A; PEREIRA, R.M. de A.; ARAÚJO FILHO, J.A. de. **Cunhã; leguminosa forrageira**. Fortaleza, UFC. Centro de Ciências Agrárias, 9p, 1982.

GATES, T.K.; HEYDER, W.E.; FONTANE, D.G.; SALAS, J.D. Multicritérior strategic planning for improved irrigation delivery. I: Approach. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 117, n. 6, p. 897-913, 1991.

GOMES, M. L. A. **Função de produção do algodoeiro herbáceo (*G. hirsutum* L. r. *latifolium* Hutch), aos níveis de água e fertilizante no município de Pentecoste, Ceará**. 2000. 54p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem). Universidade Federal do Ceará.

GONÇALVES, C. A.; CAMARÃO, A. P.; SIMÃO NETO, M.; DUTRA, S. Consorciação de gramíneas e leguminosas forrageiras e fertilização fosfatado no nordeste paraense, Brasil. **Pasturas tropicales**. v.19. n. 3. 1997.

GONDIM, R.S. **Análise econômico-comparativa do monitoramento da irrigação com caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) através de tensiômetros, tanque Classe "A" e Método de Hangreaves**. Fortaleza: UFC, 1998. 104p. Dissertação de Mestrado em Irrigação e Drenagem.

GRANT, C.A.; PLATEN, D.N.; TOMAZIEWICZ, D.J.; SHEPPARD, S.C. A importância do fósforo no desenvolvimento inicial da planta. **Informações Agrônomicas**, Piracicaba, n.95, 2001.

HANKS, R. J.; RASMUSSEN, V. P.; WILSON, G. D. Line source sprinkler for continuous variable irrigation - crop production studies. **Soil Science Society American Proceedings**, v. 40, p. 426 - 9, 1976.

IBGE – **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/agropecuaria> .Acesso em: 23 de jun. de 2008.

KROLOW, R.H.; MISTURA, C.; COELHO, R. W.; SIEWERDT, L.; ZONTA, E.P. Efeito do fósforo e do potássio sobre o desenvolvimento e a nodulação de leguminosas anuais de estação fria. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.33, n.6, p.2224-2230, 2004 (Supl. 3).

LOPES, A. S. Manual de fertilidade do solo. Trad. e adap. de Alfredo Scheid Lopes. São Paulo, ANDA/POTAFOS, 1989. 153p. Título original: **Soil fertility manual, de Potash Phosphate Institute**, 1978.

LOPES, J. J.; ARAÚJO FILHO, J.A. de. Suplementação protéica de novilhos mestiços em regime de pastagem nativa melhorado no sertão central do Ceará. In: REUNIÃO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ZOOTECNIA, 18, 1981, Goiânia. **Anais**. Goiânia: SBZ, 1981. p. 364.

MARTHA JR., G. B. & VILELA, L. Pastagens no cerrado: baixa produtividade pelo uso limitado de fertilizantes em pastagens. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2002. 32 p. (**Documentos, 50**).

MARTIN, F.; VALERO, A. J. de. **Agronomia Del Riega**. Mundi-Prusa. 1993. 732 p. Cap. VII.

MENDES, A.J.P. **Estabelecimento de calendários de irrigação para o manejo racional do Perímetro K do projeto de irrigação Morada Nova “utilizando o Programa CROPWAT”**. Fortaleza: UFC, 1997. 115P. Dissertação de Mestrado em Irrigação e Drenagem.

MONTEIRO, R. O. C., **Função de resposta da cultura do meloeiro aos níveis de água e adubação nitrogenada no Vale do Curu - CE**. Fortaleza, 2004. 73f. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Universidade Federal do Ceará - UFC.

MOREIRA, J.O.; VIDAL NETO, F. das; ARAGÃO JÚNIOR, T.C. A cultura da cunhã. Fortaleza: EPACE, 1988. 16p. (**EPACE. Circular Técnica, 4**).

MOUSINHO, F. E. P. **Função de resposta da melancia à aplicação de água e adubo nitrogenado para as condições edafoclimáticas da Fortaleza, Ce**. 2002. 61f. (Dissertação de Mestrado em Irrigação e Drenagem, UFC, Fortaleza, Ceará).

NASCIMENTO, J. T.; da SILVA, I. de F. Avaliação quantitativa e qualitativa da fitomassa de leguminosas para uso como cobertura de solo. **Ciência Rural**, v.34, n.33, mai-jun, 2004.

PESSOA, A.C.S.; KELLING, C.R.S.; POZZEBON, E.J.; KONIG, O. Concentração e acumulação de nitrogênio, fósforo e potássio pelo feijoeiro cultivado sob diferentes níveis de irrigação. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.16, n.1, p.69-74, 1996.

PLAYÁN, E.; MATEOS, L., 2006. Modernization and optimization of irrigation systems to increase water productivity. *Agric. Water Manage.* 80, 100-116.

RASSINI, J.B.; LEME, E. J. A. de. Manejo da água para estabelecimento de alfafa (*Medicago sativa* L.). *Revista Brasileira de Zootecnia*. V. 30, n. 2, p. 310-317, 2001.

RICHARDS, L. A. (ed.) Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. Washington DC, US Department of Agriculture, 1954. 160p. (USDA Agricultural Handbook, 60).

RIBEIRO, E. M. **Produtividade da capim tanzânia em função da lâmina de água e da adubação nitrogenada no Vale do Curu, Ce.** Fortaleza: UFC, 2006. 80p. Dissertação de Mestrado em Irrigação e Drenagem.

RODRIGUES, J.A.L. **Plano ótimo de cultivo no projeto de irrigação Morada Nova, Ceará, utilizando Modelo de Programação linear.** Fortaleza: UFC, 2000. 80p. Dissertação de Mestrado em Irrigação e Drenagem.

SANCHES, N. F.; DANTAS, J. L. L. O cultivo do mamão. *Circular Técnica*, 34. EMBRAPA, 105 p., 1999.

SARMENTO, P.; CORSI, M.; de CAMPOS, F. P. Dinâmica do surgimento de brotos de alfafa em função de diferentes fontes de fósforo, da aplicação de gesso e do momento da calagem. *Revista Brasileira de Zootecnia*. v.31, n.3, p.1103-1116, 2002.

SILVA, D.J.; QUEIROZ, C. **Análise de alimentos (Métodos químicos e biológicos).** Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2002. 235p.

SOARES, J.I., COSTA, R.N.T., SILVA, L.A.C. da, GONDIM, R.S. Função de resposta da melancia aos níveis de água e adubação nitrogenada, no Vale do Curu, Ce. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. Campina Grande, v.6, n.2, p.219-224,2002.

SOUZA, F. B. de; OLIVEIRA, M. C. de; QUEIROZ, M. A. de; GOEDERT, C. O.; RAMOS, S. R. R. **Recursos genéticos e melhoramento de plantas para o nordeste brasileiro.** Petrolina-PE: Embrapa semi-árido / Brasília-DF: Embrapa recursos genéticos e biotecnologia. Nov. 1999.

SOUSA, V. F. de **Níveis de irrigação e doses de potássio aplicados via fertirrigação por gotejamento no maracujazeiro amarelo (*Passiflora edulis* Sims. *F. flavicarpa* Deg).** Piracicaba, 2000. 178p. Dissertação (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.

VIANA, J.J. **Efeito da irrigação e época de corte na produção e qualidade nutritiva da cunha (*Clitória ternatea L.*)**. Campina Grande, 1983, 59 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 1983.

WERNER, J.C. **Adubação de pastagens**. 2.ed. Nova Odessa: Instituto de Zootecnia, 1986. 49p.

ZUCARELI, C.; RAMOS JÚNIOR, E. D.; BARREIRO, A. P.; NAKAGAWA, J.; CAVARIANI, C. Adubação fosfatada, componentes de produção, produtividade e qualidade fisiológica em sementes de feijão. **Revista Brasileira de Sementes**, vol. 28, nº 1, p.09-15, 2006.

## **ANEXOS**



ANEXO 1. Produtividade da cunhã, em  $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ , em função das lâminas de água, em mm, e dos níveis de fósforo, em  $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ .

| Irrigação<br>(W) | Fósforo<br>(P) | Blocos  |         |         |         |
|------------------|----------------|---------|---------|---------|---------|
|                  |                | I       | II      | III     | IV      |
| W <sub>1</sub>   | P <sub>0</sub> | 83860.0 | 86740.0 | 64393.3 | 75400.0 |
|                  | P <sub>1</sub> | 63820.0 | 63033.3 | 65533.3 | 72033.3 |
|                  | P <sub>2</sub> | 82800.0 | 71520.0 | 72253.3 | 71993.3 |
|                  | P <sub>3</sub> | 80753.3 | 70080.0 | 63106.7 | 80326.7 |
| W <sub>2</sub>   | P <sub>0</sub> | 88873.3 | 69553.3 | 52446.7 | 62860.0 |
|                  | P <sub>1</sub> | 86080.0 | 73120.0 | 66280.0 | 74926.7 |
|                  | P <sub>2</sub> | 88806.7 | 65540.0 | 59613.3 | 76426.7 |
|                  | P <sub>3</sub> | 75493.3 | 60766.7 | 68413.3 | 63926.7 |
| W <sub>3</sub>   | P <sub>0</sub> | 70133.3 | 72346.7 | 65200.0 | 63760.0 |
|                  | P <sub>1</sub> | 89020.0 | 73600.0 | 56753.3 | 66566.7 |
|                  | P <sub>2</sub> | 72626.7 | 77686.7 | 70386.7 | 55000.0 |
|                  | P <sub>3</sub> | 75646.7 | 79400.0 | 54713.3 | 64926.7 |
| W <sub>4</sub>   | P <sub>0</sub> | 63366.7 | 57920.0 | 51886.7 | 43886.7 |
|                  | P <sub>1</sub> | 67586.7 | 55846.7 | 68093.3 | 58846.7 |
|                  | P <sub>2</sub> | 62880.0 | 59740.0 | 59620.0 | 66006.7 |
|                  | P <sub>3</sub> | 80220.0 | 63606.7 | 54113.3 | 48486.7 |

Anexo 2 – Resumo da análise de regressão múltipla, para os dez modelos matemáticos testados, da produtividade da cunhã em função das diferentes lâminas de água (W) e níveis de fósforo (P)

The SAS System 1

The REG Procedure  
Model : MODEL 1  
Dependent Variable: y5

Analysis of Variance

| Source          | DF | Sum of Squares | Mean Square | F Value | Pr > F |
|-----------------|----|----------------|-------------|---------|--------|
| Model           | 5  | 423671769      | 84734354    | 6.74    | 0.0054 |
| Error           | 10 | 125753183      | 12575318    |         |        |
| Corrected Total | 15 | 549424952      |             |         |        |

|                |            |          |        |
|----------------|------------|----------|--------|
| Root MSE       | 3546.16953 | R-Square | 0.7711 |
| Dependent Mean | 68291      | Adj R-Sq | 0.6567 |
| Coeff Var      | 5.19271    |          |        |

Parameter Estimates

| Variable  | DF | Parameter Estimate | Standard Error | t Value | Pr >  t |
|-----------|----|--------------------|----------------|---------|---------|
| Intercept | 1  | -18339             | 160500         | -0.11   | 0.9113  |
| w         | 1  | -27.82550          | 338.21932      | -0.08   | 0.9361  |
| n         | 1  | -14.86854          | 19.25369       | -0.77   | 0.4578  |
| w1        | 1  | 4363.72007         | 14812          | 0.29    | 0.7743  |
| n1        | 1  | 2216.18942         | 1184.67296     | 1.87    | 0.0909  |
| w1n1      | 1  | -80.63031          | 48.53695       | -1.66   | 0.1277  |

## The SAS System 2

## The REG Procedure

Model: MODEL 2

Dependent Variable: y5

## Analysis of Variance

| Source          | DF | Sum of Squares | Mean Square | F Value | Pr > F |
|-----------------|----|----------------|-------------|---------|--------|
| Model           | 5  | 412429829      | 82485966    | 6.02    | 0.0080 |
| Error           | 10 | 136995123      | 13699512    |         |        |
| Corrected Total | 15 | 549424952      |             |         |        |

|                |            |          |        |
|----------------|------------|----------|--------|
| Root MSE       | 3701.28522 | R-Square | 0.7507 |
| Dependent Mean | 68291      | Adj R-Sq | 0.6260 |
| Coeff Var      | 5.41984    |          |        |

## Parameter Estimates

| Variable  | DF | Parameter Estimate | Standard Error | t Value | Pr >  t |
|-----------|----|--------------------|----------------|---------|---------|
| Intercept | 1  | -3487.13664        | 167000         | -0.02   | 0.9838  |
| w         | 1  | -11.58499          | 353.23169      | -0.03   | 0.9745  |
| n         | 1  | 23.50418           | 35.54777       | 0.66    | 0.5234  |
| w1        | 1  | 3340.09486         | 15446          | 0.22    | 0.8332  |
| n1        | 1  | 366.25828          | 421.83464      | 0.87    | 0.4056  |
| wn        | 1  | -0.07218           | 0.05516        | -1.31   | 0.2199  |

## The SAS System 3

## The REG Procedure

Model: MODEL 3

Dependent Variable: y5

## Analysis of Variance

| Source          | DF | Sum of Squares | Mean Square | F Value | Pr > F |
|-----------------|----|----------------|-------------|---------|--------|
| Model           | 4  | 388968477      | 97242119    | 6.67    | 0.0056 |
| Error           | 11 | 160456474      | 14586952    |         |        |
| Corrected Total | 15 | 549424952      |             |         |        |

|                |            |          |        |
|----------------|------------|----------|--------|
| Root MSE       | 3819.28687 | R-Square | 0.7080 |
| Dependent Mean | 68291      | Adj R-Sq | 0.6018 |
| Coeff Var      | 5.59264    |          |        |

## Parameter Estimates

| Variable  | DF | Parameter Estimate | Standard Error | t Value | Pr >  t |
|-----------|----|--------------------|----------------|---------|---------|
| Intercept | 1  | 5146.72516         | 172190         | 0.03    | 0.9767  |
| w         | 1  | -27.82550          | 364.26814      | -0.08   | 0.9405  |
| n         | 1  | -14.86854          | 20.73656       | -0.72   | 0.4883  |
| w1        | 1  | 3340.09486         | 15939          | 0.21    | 0.8378  |
| n1        | 1  | 366.25828          | 435.28326      | 0.84    | 0.4180  |

## The SAS System 4

## The REG Procedure

Model: MODEL 4

Dependent Variable: y5

## Analysis of Variance

| Source          | DF | Sum of Squares | Mean Square | F Value | Pr > F |
|-----------------|----|----------------|-------------|---------|--------|
| Model           | 5  | 414948310      | 82989662    | 6.17    | 0.0073 |
| Error           | 10 | 134476642      | 13447664    |         |        |
| Corrected Total | 15 | 549424952      |             |         |        |

|                |            |          |        |
|----------------|------------|----------|--------|
| Root MSE       | 3667.10570 | R-Square | 0.7552 |
| Dependent Mean | 68291      | Adj R-Sq | 0.6329 |
| Coeff Var      | 5.36979    |          |        |

## Parameter Estimates

| Variable  | DF | Parameter Estimate | Standard Error | t Value | Pr >  t |
|-----------|----|--------------------|----------------|---------|---------|
| Intercept | 1  | 24398              | 39466          | 0.62    | 0.5503  |
| w         | 1  | 100.03774          | 167.68463      | 0.60    | 0.5640  |
| n         | 1  | 58.22980           | 34.78604       | 1.67    | 0.1251  |
| w2        | 1  | -0.03628           | 0.17154        | -0.21   | 0.8368  |
| n2        | 1  | -0.03988           | 0.04075        | -0.98   | 0.3507  |
| wn        | 1  | -0.07218           | 0.05465        | -1.32   | 0.2160  |

## The SAS System 5

## The REG Procedure

Model: MODEL 5

Dependent Variable: y5

## Analysis of Variance

| Source          | DF | Sum of Squares | Mean Square | F Value | Pr > F |
|-----------------|----|----------------|-------------|---------|--------|
| Model           | 4  | 391486959      | 97871740    | 6.82    | 0.0052 |
| Error           | 11 | 157937993      | 14357999    |         |        |
| Corrected Total | 15 | 549424952      |             |         |        |

|                |            |          |        |
|----------------|------------|----------|--------|
| Root MSE       | 3789.19508 | R-Square | 0.7125 |
| Dependent Mean | 68291      | Adj R-Sq | 0.6080 |
| Coeff Var      | 5.54857    |          |        |

## Parameter Estimates

| Variable  | DF | Parameter Estimate | Standard Error | t Value | Pr >  t |
|-----------|----|--------------------|----------------|---------|---------|
| Intercept | 1  | 33032              | 40217          | 0.82    | 0.4289  |
| w         | 1  | 83.79723           | 172.80095      | 0.48    | 0.6372  |
| n         | 1  | 19.85709           | 19.77009       | 1.00    | 0.3368  |
| w2        | 1  | -0.03628           | 0.17725        | -0.20   | 0.8416  |
| n2        | 1  | -0.03988           | 0.04210        | -0.95   | 0.3638  |

## The SAS System 6

## The REG Procedure

Model: MODEL 6

Dependent Variable: y5

## Analysis of Variance

| Source          | DF | Sum of Squares | Mean Square | F Value | Pr > F |
|-----------------|----|----------------|-------------|---------|--------|
| Model           | 5  | 414401768      | 82880354    | 6.14    | 0.0075 |
| Error           | 10 | 135023183      | 13502318    |         |        |
| Corrected Total | 15 | 549424952      |             |         |        |

|                |            |          |        |
|----------------|------------|----------|--------|
| Root MSE       | 3674.55009 | R-Square | 0.7542 |
| Dependent Mean | 68291      | Adj R-Sq | 0.6314 |
| Coeff Var      | 5.38070    |          |        |

## Parameter Estimates

| Variable  | DF | Parameter Estimate | Standard Error | t Value | Pr >  t |
|-----------|----|--------------------|----------------|---------|---------|
| Intercept | 1  | 21319              | 53250          | 0.40    | 0.6973  |
| w         | 1  | 137.06625          | 339.32361      | 0.40    | 0.6948  |
| n         | 1  | 69.95359           | 42.91776       | 1.63    | 0.1342  |
| w15       | 1  | -2.19187           | 10.27043       | -0.21   | 0.8353  |
| n15       | 1  | -1.39100           | 1.45592        | -0.96   | 0.3619  |
| wn        | 1  | -0.07218           | 0.05476        | -1.32   | 0.2168  |

## The SAS System 7

## The REG Procedure

Model: MODEL 7

Dependent Variable: y5

## Analysis of Variance

| Source          | DF | Sum of Squares | Mean Square | F Value | Pr > F |
|-----------------|----|----------------|-------------|---------|--------|
| Model           | 4  | 390940417      | 97735104    | 6.78    | 0.0053 |
| Error           | 11 | 158484535      | 14407685    |         |        |
| Corrected Total | 15 | 549424952      |             |         |        |

|                |            |          |        |
|----------------|------------|----------|--------|
| Root MSE       | 3795.74564 | R-Square | 0.7115 |
| Dependent Mean | 68291      | Adj R-Sq | 0.6067 |
| Coeff Var      | 5.55816    |          |        |

## Parameter Estimates

| Variable  | DF | Parameter Estimate | Standard Error | t Value | Pr >  t |
|-----------|----|--------------------|----------------|---------|---------|
| Intercept | 1  | 29953              | 54589          | 0.55    | 0.5942  |
| w         | 1  | 120.82574          | 350.28419      | 0.34    | 0.7366  |
| n         | 1  | 31.58087           | 32.57599       | 0.97    | 0.3532  |
| w15       | 1  | -2.19187           | 10.60917       | -0.21   | 0.8401  |
| n15       | 1  | -1.39100           | 1.50394        | -0.92   | 0.3749  |



## The SAS System 8

## The REG Procedure

Model : MODEL 8

Dependent Variable: y5

## Analysis of Variance

| Source          | DF | Sum of Squares | Mean Square | F Value | Pr > F |
|-----------------|----|----------------|-------------|---------|--------|
| Model           | 3  | 377002328      | 125667443   | 8.75    | 0.0024 |
| Error           | 12 | 172422624      | 14368552    |         |        |
| Corrected Total | 15 | 549424952      |             |         |        |

|                |            |          |        |
|----------------|------------|----------|--------|
| Root MSE       | 3790.58729 | R-Square | 0.6862 |
| Dependent Mean | 68291      | Adj R-Sq | 0.6077 |
| Coeff Var      | 5.55061    |          |        |

## Parameter Estimates

| Variable  | DF | Parameter Estimate | Standard Error | t Value | Pr >  t |
|-----------|----|--------------------|----------------|---------|---------|
| Intercept | 1  | 34308              | 40212          | 0.85    | 0.4103  |
| w         | 1  | 83.79723           | 172.86444      | 0.48    | 0.6366  |
| w2        | 1  | -0.03628           | 0.17732        | -0.20   | 0.8413  |
| n2        | 1  | 0.00064043         | 0.01203        | 0.05    | 0.9584  |

## The SAS System 9

## The REG Procedure

Model: MODEL 9

Dependent Variable: y5

NOTE: No intercept in model. R-Square is redefined.

## Analysis of Variance

| Source            | DF | Sum of Squares | Mean Square | F Value | Pr > F |
|-------------------|----|----------------|-------------|---------|--------|
| Model             | 5  | 75029161905    | 15005832381 | 1182.27 | <.0001 |
| Error             | 11 | 139615877      | 12692352    |         |        |
| Uncorrected Total | 16 | 75168777782    |             |         |        |

|                |            |          |        |
|----------------|------------|----------|--------|
| Root MSE       | 3562.63280 | R-Square | 0.9981 |
| Dependent Mean | 68291      | Adj R-Sq | 0.9973 |
| Coeff Var      | 5.21681    |          |        |

## Parameter Estimates

| Variable | DF | Parameter Estimate | Standard Error | t Value | Pr >  t |
|----------|----|--------------------|----------------|---------|---------|
| w        | 1  | 202.88888          | 20.33459       | 9.98    | <.0001  |
| n        | 1  | 61.57296           | 33.38413       | 1.84    | 0.0922  |
| w2       | 1  | -0.13992           | 0.03524        | -3.97   | 0.0022  |
| n2       | 1  | -0.04047           | 0.03957        | -1.02   | 0.3285  |
| wn       | 1  | -0.07778           | 0.05236        | -1.49   | 0.1655  |

The SAS System 10

The REG Procedure

Model : MODEL 10

Dependent Variable: y5

NOTE: No intercept in model. R-Square is redefined.

Analysis of Variance

| Source            | DF | Sum of Squares | Mean Square | F Value | Pr > F |
|-------------------|----|----------------|-------------|---------|--------|
| Model             | 4  | 75001153975    | 18750288494 | 1342.31 | <.0001 |
| Error             | 12 | 167623806      | 13968651    |         |        |
| Uncorrected Total | 16 | 75168777782    |             |         |        |

|                |            |          |        |
|----------------|------------|----------|--------|
| Root MSE       | 3737.46579 | R-Square | 0.9978 |
| Dependent Mean | 68291      | Adj R-Sq | 0.9970 |
| Coeff Var      |            | 5.47282  |        |

Parameter Estimates

| Variable | DF | Parameter Estimate | Standard Error | t Value | Pr >  t |
|----------|----|--------------------|----------------|---------|---------|
| w        | 1  | 225.21993          | 14.36544       | 15.68   | <.0001  |
| n        | 1  | 20.37023           | 19.49046       | 1.05    | 0.3166  |
| w2       | 1  | -0.18056           | 0.02331        | -7.75   | <.0001  |
| n2       | 1  | -0.04070           | 0.04152        | -0.98   | 0.3463  |