



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PIAUÍ  
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
COORDENADORIA GERAL DE PÓS-GRADUAÇÃO  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA/PRODUÇÃO VEGETAL**

**KADSON DE SOUSA ALVES**

**FUNÇÃO DE RESPOSTA DO MILHO VERDE A ADUBAÇÃO FOSFATADA E  
NITROGENADA EM TERESINA-PI**

**TERESINA, PIAUÍ – BRASIL  
2013**

**KADSON DE SOUSA ALVES**

**FUNÇÃO DE RESPOSTA DO MILHO VERDE A ADUBAÇÃO FOSFATADA E  
NITROGENADA EM TERESINA-PI**

**TERESINA, PIAUÍ – BRASIL  
2013**

**KADSON DE SOUSA ALVES**  
**Eng. Agrônomo**

**FUNÇÃO DE RESPOSTA DO MILHO VERDE A ADUBAÇÃO FOSFATADA E  
NITROGENADA EM TERESINA-PI**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia da Universidade Federal do Piauí, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Agronomia, Área de Concentração: Produção Vegetal.

**Orientador:** Prof. Dr. Francisco Edinaldo Pinto Mousinho

**Co-orientadora:** Profa. Dra. Poliana Rocha D'Almeida Mota Soares

**TERESINA, PIAUÍ – BRASIL**  
**2013**

**A474f**

Alves, Kadson de Sousa

Função de resposta do milho verde a adubação fosfatada e nitrogenada em Teresina - PI. / Kadson de Sousa Alves / 2013.

74 f. : il.

Dissertação ( Mestrado em Agronomia ) - Universidade Federal do Piauí, Teresina, 2013.

Orientação: Prof. Dr. Francisco Edinaldo Pinto Mousinho

Co-orientação: Profa. Dra. Poliana Rocha D'Almeida Mota  
Suares

1. *Zea mays* 2. Superfície de resposta 3. Número de espigas l. Título

**CDD 633.15**

FUNÇÃO DE RESPOSTA DO MILHO VERDE A ADUBAÇÃO FOSFATADA  
E NITROGENADA EM TERESINA-PI.

Kadson de Sousa Alves  
Engenheiro Agrônomo

Aprovado em 26 / 09 / 2013

**Comissão Julgadora:**

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Francisco Edinaldo Pinto Mousinho – Presidente  
CTT/CCA/UFPI

  
\_\_\_\_\_  
Profa. Dra. Poliana Rocha D'Almeida Mota Suares – Titular  
CCA/UFPI

  
\_\_\_\_\_  
Profa. Dra. Maria da Conceição Bezerra da Silva Matias - Titular  
CTF/UFPI

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Carlos José Gonçalves de Souza Lima – Titular  
CCA/UFPI

*À minha mãe, exemplo de amor, compreensão e fé, por sua confiança e apoio incondicionais.*

*Ao meu pai, exemplo de perseverança e determinação, a quem tenho profunda admiração.*

## **DEDICO**

*Ao meu filho: João Matheus Alves da Silva, motivo e razão da minha vida; à minha esposa:*

*Karoline Barros da Silva pelo carinho, amizade e companheirismo; à minha amiga: Natalia*

*Soares da Silva pela sincera amizade, incentivo e confiança.*

## **OFEREÇO**

## AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me proporcionado este momento e por me acolher em sua infinita bondade, abençoando-me todos os dias da minha vida;

Ao meu orientador Prof. Dr. Francisco Edinaldo Pinto Mousinho pela compreensão e paciência, bem como pelos ensinamentos e conhecimentos transmitidos com muito respeito e humildade;

À minha co-orientadora Profa. Dra. Poliana Rocha D'Almeida Mota Suares pela paciência, conselhos e ensinamentos, certamente, de grande valia para formação profissional e pessoal;

Ao Programa de Pós - Graduação em Agronomia da Universidade Federal do Piauí por ter me proporcionado uma oportunidade de obtenção de diploma de pós-graduação;

Aos demais professores do curso de Mestrado em Agronomia do PPGA que contribuíram para o meu aprendizado com conhecimento e ética profissional em suas respectivas disciplinas;

Ao Colégio Técnico de Teresina na pessoa do Prof. José Bento por disponibilizar suporte técnico para instalação do experimento;

Aos meus irmãos, primos e demais parentes que estiveram engajados em algum momento neste trabalho, incentivando ou apoiando de uma ou outra maneira;

Aos amigos do Colégio Técnico de Teresina Hellionay Rodrigues, Cleucione Silva, Ismael Brandão e Flávio Cavalcante pelo substancial auxílio na instalação e condução do experimento;

Aos colegas de classe Francisco Leonardo, Sabrina Carvalho, Leonardo Sousa, Eliana Pessoa, Mauricio Castelo Branco, Alane Rosane, Emerson Santos, Agenor Rocha pela inestimável ajuda na instalação ou condução do experimento em campo ou que, de alguma forma, contribuíram para concretização deste trabalho;

Ao CNPq pela bolsa de estudo concedida e financiamento integral desta pesquisa.

## ÍNDICE

	Páginas
LISTA DE FIGURAS.....	x
LISTA DE TABELAS.....	xii
RESUMO.....	xiv
ABSTRACT.....	xv
1 INTRODUÇÃO.....	16
2 REVISÃO DE LITERATURA .....	19
2.1 A cultura do milho.....	19
2.2 Efeito do fósforo sobre o rendimento do milho.....	21
2.3 Efeito do nitrogênio sobre o rendimento do milho.....	23
2.4 Função de produção.....	24
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	27
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	36
4.1 Efeito da adubação fosfatada e nitrogenada.....	36
4.1.1 Rendimento.....	36
4.1.2 Número de espigas.....	39
4.2 Produto marginal do N e P para rendimento.....	41
4.2.1 Doses economicamente ótimas de P e N para rendimento.....	42
4.3 Produto marginal do N e P para número de espigas.....	45
4.3.1 Doses economicamente ótimas de P e N para número de espigas.....	46
4.4 Superfície de resposta do rendimento do milho verde ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) em função das doses de P e N.....	48
4.5 Superfície de resposta do número de espigas de milho verde ( $\text{esp ha}^{-1}$ ) em função das doses de P e N.....	50
4.6 Isoquantas do rendimento.....	51
4.6.1 Isoquantas do número de espigas.....	52
4.7 Região de produção racional de milho para rendimento.....	52
4.7.1 Região de produção racional de milho para número de espigas.....	53
4.8 Produto físico marginal do P e N para rendimento.....	54
4.8.1 Produto físico marginal do P e N para número de espigas.....	55
4.9 Taxa marginal de substituição do N por P ( $\text{TMS}_{N/P}$ ) para rendimento.....	56
4.9.1 Taxa marginal de substituição do N por P ( $\text{TMS}_{N/P}$ ) para número de espigas..	58

5	Custo mínimo para um determinado nível de rendimento de milho.....	59
5.1	Custo mínimo para um determinado nível de número de espigas.....	59
6	Maximização da receita líquida para rendimento.....	60
6.1	Maximização da receita líquida para número de espigas.....	60
7	CONCLUSÕES.....	62
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	63
9	ANEXOS.....	68

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b>	Detalhe dos sulcos de plantio na área experimental.....	28
<b>Figura 2.</b>	Croqui da área experimental destacando a parcela experimental.....	29
<b>Figura 3.</b>	Detalhe da área útil na parcela experimental.....	29
<b>Figura 4.</b>	Vista da área experimental com a cultura estabelecida, CTT, Teresina – PI.....	30
<b>Figura 5.</b>	Rendimento do milho verde ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) em função das doses de nitrogênio.....	37
<b>Figura 6.</b>	Rendimento do milho verde ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) em função das doses de fósforo.....	38
<b>Figura 7.</b>	Número de espigas comerciais ( $\text{esp ha}^{-1}$ ) em função das doses de nitrogênio.....	40
<b>Figura 8.</b>	Número de espigas comerciais ( $\text{esp ha}^{-1}$ ) em função das doses de fósforo.....	41
<b>Figura 9.</b>	Dose de $\text{P}_2\text{O}_5$ economicamente ótima em função da relação entre o preço do N ( $P_N$ ) e o preço do milho ( $P_M$ ).....	43
<b>Figura 10.</b>	Rendimento do milho verde a partir das doses economicamente ótimas de N em função da relação entre o preço do N ( $P_N$ ) e o preço do milho ( $P_M$ ).....	44
<b>Figura 11.</b>	Dose de N economicamente ótima para cada dose de fósforo em função da relação entre o preço do fósforo ( $P_P$ ) e o preço do milho ( $P_M$ ).....	44
<b>Figura 12.</b>	Rendimento do milho verde a partir das doses economicamente ótimas de $\text{P}_2\text{O}_5$ em função da relação entre o preço do fósforo ( $P_P$ ) e o preço do milho ( $P_M$ ).....	45
<b>Figura 13.</b>	Dose de $\text{P}_2\text{O}_5$ economicamente ótima em função da relação entre o preço do N ( $P_N$ ) e o preço do milho ( $P_M$ ).....	46
<b>Figura 14.</b>	Número de espigas de milho a partir das doses economicamente ótimas de nitrogênio em função da relação entre o preço do N ( $P_N$ ) e o preço do milho ( $P_M$ ).....	47

<b>Figura 15.</b>	Dose de N economicamente ótima em função da relação entre o preço do fósforo ( $P_P$ ) e o preço do milho ( $P_M$ ).....	47
<b>Figura 16.</b>	Número de espigas de milho verde a partir das doses economicamente ótimas de fósforo em função da relação entre o preço do fósforo ( $P_P$ ) e o preço do milho ( $P_M$ ).....	48
<b>Figura 17.</b>	Superfície de resposta do rendimento do milho verde ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) em função das doses de fósforo e nitrogênio, em $\text{kg ha}^{-1}$ .....	49
<b>Figura 18.</b>	Superfície de resposta do número de espigas de milho verde ( $\text{esp ha}^{-1}$ ) em função das doses de fósforo e nitrogênio, em $\text{kg ha}^{-1}$ ...	52
<b>Figura 19.</b>	Curvas de isoprodutos para o rendimento do milho verde ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) em função das doses de fósforo e nitrogênio, em $\text{kg ha}^{-1}$ .....	52
<b>Figura 20.</b>	Curvas de isoprodutos para número de espigas em função das doses de fósforo e nitrogênio, em $\text{kg ha}^{-1}$ .....	52
<b>Figura 21.</b>	Região de produção racional do milho verde ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) em função das doses de fósforo e nitrogênio.....	53
<b>Figura 22.</b>	Região de produção racional do milho verde ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) em função das doses de fósforo e nitrogênio.....	54

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b>	Atributos químicos do solo na camada de 0,00 - 0,20 m anterior à instalação do experimento.....	27
<b>Tabela 2.</b>	Atributos físicos do solo na camada de 0,00 - 0,20 m anterior à instalação do experimento.....	27
<b>Tabela 3.</b>	Valores médios do rendimento de milho verde ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) em função das doses de N e P ( $\text{kg ha}^{-1}$ ).....	36
<b>Tabela 4.</b>	Resumo da análise de variância do rendimento do milho ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) em função das doses de N e P ( $\text{kg ha}^{-1}$ ).....	37
<b>Tabela 5.</b>	Valores médios do número de espigas ( $\text{esp ha}^{-1}$ ) em função das doses de N e P ( $\text{kg ha}^{-1}$ ).....	39
<b>Tabela 6.</b>	Resumo da análise de variância do número de espigas ( $\text{esp ha}^{-1}$ ) em função das doses de N e P ( $\text{kg ha}^{-1}$ ).....	40
<b>Tabela 7.</b>	Produto marginal do N para as diferentes doses de nitrogênio aplicadas, correspondentes a cada dose de P.....	42
<b>Tabela 8.</b>	Produto marginal do P para as diferentes doses de fósforo aplicadas, correspondentes a cada dose de N.....	42
<b>Tabela 9.</b>	Produto marginal do N para as diferentes doses de nitrogênio aplicadas, correspondentes a cada dose de P.....	45
<b>Tabela 10.</b>	Produto marginal do P para as diferentes doses de fósforo aplicadas, correspondentes a cada dose de N.....	46
<b>Tabela 11.</b>	Produto físico marginal do P ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) para as diferentes doses de P (valor superior) e produto físico marginal do N ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) para as diferentes doses de N (valor inferior).....	55
<b>Tabela 12.</b>	Produto físico marginal do P ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) para as diferentes doses de P (valor superior) e produto físico marginal do N ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) para as diferentes doses de N (valor inferior).....	56
<b>Tabela 13.</b>	Taxa marginal de substituição de N por P ( $\text{TMS}_{\text{N/P}}$ ) para o rendimento do milho ( $\text{kg ha}^{-1}$ ).....	57
<b>Tabela 14.</b>	Taxa marginal de substituição de N por P ( $\text{TMS}_{\text{N/P}}$ ) para o número de espigas ( $\text{esp ha}^{-1}$ ).....	58

<b>Tabela 15.</b> Quantidade de P e N ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) que proporcionam o menor custo (CTm), em R\$ $\text{ha}^{-1}$ , para níveis pré estabelecidos de rendimento em $\text{kg ha}^{-1}$ .....	59
<b>Tabela 16.</b> Quantidade de P e N ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) que proporcionam o menor custo (CTm), em R\$ $\text{ha}^{-1}$ , para níveis pré estabelecidos de número de espigas ( $\text{esp ha}^{-1}$ ).....	59

## FUNÇÃO DE RESPOSTA DO MILHO VERDE A ADUBAÇÃO FOSFATADA E NITROGENADA EM TERESINA-PI

**Autor:** Kadson de Sousa Alves

**Orientador:** Prof. Dr. Francisco Edinaldo Pinto Mousinho

**Co-orientadora:** Profa. Dra. Poliana Rocha D'Almeida Mota Soares

**RESUMO** – Com o objetivo de avaliar a resposta do milho a aplicação de diferentes doses de adubação nitrogenada e fosfatada nas condições edafoclimáticas de Teresina, Piauí, realizou-se um ensaio na área experimental do Colégio Técnico de Teresina no período de dezembro de 2012 a fevereiro de 2013. Foi utilizado o delineamento experimental inteiramente casualizado em esquema fatorial e quatro repetições. Os tratamentos constituíram-se da combinação de quatro níveis de adubação fosfatada ( $P_0 = 0$ ,  $P_1 = 80$ ,  $P_2 = 160$  e  $P_3 = 240$  kg  $ha^{-1}$ ) e cinco níveis de adubação nitrogenada ( $N_0 = 0$ ,  $N_1 = 75$ ,  $N_2 = 150$ ,  $N_3 = 225$  e  $N_4 = 300$  kg  $ha^{-1}$ ). Utilizou-se o híbrido duplo de milho AG 1051 no espaçamento entre linhas de 0,8 m e seis plantas por metro. As adubações fosfatadas e nitrogenadas foram aplicadas de acordo com os tratamentos e a adubação potássica foi baseada na análise do solo. Foram avaliados o rendimento do milho verde a partir das massas das espigas comerciais e o número de espigas comerciais por hectare. Após a análise dos resultados observou-se que os fatores doses de  $P_2O_5$  e nitrogênio apresentaram efeito significativo sobre o rendimento e o número de espigas comerciais de milho. O máximo rendimento físico estimado foi de 8.043,35 kg  $ha^{-1}$  obtido com a aplicação de 169,86 kg  $ha^{-1}$  de  $P_2O_5$  e 190,09 kg  $ha^{-1}$  de N. O número máximo de espigas comerciais foi de 25.648,3 espigas  $ha^{-1}$  obtido com a aplicação de 147,94 kg  $ha^{-1}$  de  $P_2O_5$  e 189,49 kg  $ha^{-1}$  de N. A máxima receita líquida estimada em R\$ 3.581,7  $ha^{-1}$  foi obtida com um rendimento de 7.697,96 kg  $ha^{-1}$  de milho, utilizando-se 51,8 kg  $ha^{-1}$  de  $P_2O_5$  e 179,2 kg  $ha^{-1}$  de N. A máxima receita líquida estimada para número de espiga foi de R\$ 1.448,3  $ha^{-1}$  foi obtida com o número máximo de 14.863,6 espigas  $ha^{-1}$  utilizando-se 14,62 kg  $ha^{-1}$  de  $P_2O_5$  e de 51,56 kg  $ha^{-1}$  de N.

**Palavras-chave:** *Zea mays*, superfície de resposta, número de espigas

## RESPONSE FUNCTION OF GREEN MAIZE UNDER PHOSPHORUS AND NITROGEN FERTILIZATION IN TERESINA-PI

**Author:** Kadson de Sousa Alves

**Adviser:** Prof. Dr. Francisco Edinaldo Pinto Mousinho

**Co-adviser:** Profa. Dra. Poliana Rocha D'Almeida Mota Soares

**ABSTRACT** - Aiming to evaluate the response of maize to different doses of nitrogen and phosphorus fertilization under soil and climatic conditions of Teresina, Piauí, there was a test in the experimental area of the Technical College of Teresina in the period December 2012 to February 2013. We used a completely randomized design in a factorial design with four replications. The treatments were combinations of four levels of phosphorus ( $P_0 = 0$ ,  $P_1 = 80$ ,  $P_2 = P_3 = 160$  and  $240 \text{ kg ha}^{-1}$ ) and five nitrogen levels ( $N_0 = 0$ ,  $N_1 = 75$ ,  $N_2 = 150$ ,  $N_3 = 225$  and  $N_4 = 300 \text{ kg ha}^{-1}$ ). We used the double hybrid corn AG 1051 row spacing of 0.8 m and six plants per meter. The nitrogen and phosphorus fertilizers were applied according to the treatments and potassium fertilization was based on soil analysis. We evaluated the performance from the commercial yield corn and the number of commercial spikes by hectare. After analyzing the results it was observed that the factors  $P_2O_5$  levels and nitrogen had significant effect on income and number of commercial corn cobs. The estimated maximum physical performance was  $8,043.35 \text{ kg ha}^{-1}$  obtained with the application of  $169.86 \text{ kg ha}^{-1}$  of  $P_2O_5$  and  $190.09 \text{ kg ha}^{-1}$  N. The maximum number of spikes commercial was  $25,648.3 \text{ ears ha}^{-1}$  obtained with the application of  $147.94 \text{ kg ha}^{-1}$   $P_2O_5$   $189.49 \text{ kg ha}^{-1}$  N. The maximum estimated net revenue of  $R\$ 3,581.7 \text{ ha}^{-1}$  was obtained with a yield of  $7,697.96 \text{ kg ha}^{-1}$  of maize, using  $51.8 \text{ kg ha}^{-1}$  of  $P_2O_5$  and  $179.2 \text{ kg ha}^{-1}$  N. The maximum net income estimated for ear number was  $R\$ 1,448.3 \text{ ha}^{-1}$  was obtained with a maximum of  $14,863.6 \text{ ears ha}^{-1}$  using  $14.62 \text{ kg of } P_2O_5 \text{ ha}^{-1}$  and  $51.56 \text{ kg ha}^{-1}$  N.

**Key-words:** *Zea mays*, response surface, number of spikes

## 1 INTRODUÇÃO

O milho é o principal cereal produzido no Brasil, cultivado em aproximadamente 14,3 milhões de hectares, com produção de 71,4 milhões de toneladas de grãos e produtividade média de 5.020 kg ha<sup>-1</sup> (IBGE, 2012). A cultura do milho verde é uma alternativa de elevado valor econômico para pequenos e médios agricultores, principalmente em áreas irrigadas (ROCHA, 2008). Utilizado inicialmente para a rotação de culturas, o milho vem ganhando espaço nas últimas safras no Piauí por conta do crescimento da demanda no mercado interno. Na atual safra de 2013, por exemplo, a área plantada com milho grão no Estado cresceu 9,3% passando para 354,3 mil hectares, segundo a CONAB (2012). Em relação à produção houve um aumento significativo que chegou a 767,9 mil toneladas.

Dentre as diversas formas de utilização, o milho-verde se destaca pela colheita antecipada em relação ao milho produzido para comercialização dos grãos, e por agregar mais valor à produção, muito embora os rendimentos de espigas comerciais ainda estejam abaixo da média nacional (ROCHA, 2008). Segundo Veloso et al. (2009) um dos principais fatores responsáveis pelos baixos rendimentos obtidos em algumas regiões, inclusive no Piauí, é o manejo incorreto da água e da adubação nitrogenada, cuja eficiência de utilização pela planta é influenciada pelo sistemas de cultivos, tipo de fertilizante, formas de manejo e condições edafoclimáticas. De acordo com estes mesmos autores, para a cultura do milho, o nitrogênio é o nutriente aplicado em maior quantidade, o mais limitante para o crescimento e desenvolvimento da planta e o que mais onera o custo de produção.

O milho é uma cultura que absorve grandes quantidades de nitrogênio e usualmente requer o uso de adubação nitrogenada em cobertura para complementar a quantidade suprida pelo solo, quando se deseja produtividades elevadas (COELHO et al., 2006).

Para Oliveira et al. (2012) o Piauí e a região da Grande Teresina apresentam condições, tanto de solo como de clima favoráveis ao cultivo do milho-verde favorecendo o rápido desenvolvimento da cultura no Estado e aumentando a oferta do produto, tanto para consumo interno quanto para exportação. Estes autores ressaltam que, para tal, é indispensável a pesquisa e o desenvolvimento de novas tecnologias que possam melhorar o atual sistema de produção do milho, principalmente quanto ao aumento da produtividade e a redução no custo de produção.

Resultados de experimentos conduzidos no Brasil, sob diversas condições de solo, clima e sistemas de cultivo, mostram resposta generalizada do milho à adubação nitrogenada. Em geral, 70 a 90% dos ensaios de adubação com milho realizado a campo no Brasil, apresentaram respostas à aplicação de nitrogênio (EMBRAPA MILHO E SORGO, 2006).

Vasconcellos et al. (2002) reverencia que o nitrogênio, juntamente com zinco, interage com o fósforo, ou seja, quanto maior o teor de P, maiores serão as exigências de N e de Zn e a insuficiência de um nutriente reduz a eficiência de outros, o que compromete a produtividade. Segundo Coelho (2006) a maioria dos solos brasileiros apresenta baixo teor de fósforo disponível apesar de o fósforo total estar presente em quantidades razoáveis ( $50$  a  $350 \text{ kg dm}^{-3}$ ) resultando em altas recomendações de adubação desse nutriente. Ele explica que para um solo arenoso com um teor de argila baixo ( $15 \text{ kg dm}^{-3}$ ), por exemplo, são necessários de  $80$  a  $110 \text{ kg ha}^{-1}$  de P e destaca que para cada tonelada de grãos produzida são necessários  $10 \text{ kg de P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ .

A escolha da fonte de  $\text{P}_2\text{O}_5$  e do modo que ele deve ser aplicado ainda representa alguns dos principais questionamentos quando se trata de técnicas de fornecimento de P para a cultura do milho (REZENDE, 2004). O contato dos adubos fosfatados com sistema radicular das plantas de milho é determinante para uma eficiente utilização destes adubos, já que o P tem uma baixa mobilidade no solo, portanto doses reduzidas devem ser aplicadas localizadamente, já que a diluição excessiva do P no solo pode aumentar sua adsorção tornando-o indisponível a planta (BARRETO, 2002).

A relação física entre o rendimento das culturas e os fatores de produção é denominada função de resposta (VALERO; MAÑAS, 1993) e se configura em informação importante para a tomada de decisão quanto ao uso dos fatores, pois ao conhecê-la é possível escolher a combinação dos fatores de produção que maximizam a receita líquida do produtor (BARROS et al., 2002).

A cultura do milho tem sido bastante estudada no Brasil, sendo explorada visando às produções de “milho verde” e de grãos secos, o que obrigou as empresas produtoras de sementes de milho a desenvolver cultivares para consumo *in natura* que atendessem as exigências do mercado, porém, há carência de informações sobre um manejo adequado de nutrientes voltado a produção de espigas verdes (BASTOS, 2010). Desta forma, este trabalho teve por objetivo avaliar o rendimento milho para a produção

de espigas verdes em resposta a diferentes doses de adubação nitrogenada e fosfatada para as condições edafoclimáticas de Teresina, Piauí.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Cultura do milho

Fornasiere Filho (2007) classifica o milho, *Zea mays* L., como pertencente à família das *Poaceas*, sendo a única espécie cultivada do gênero. Segundo ele além da família *Poaceae* o milho pertence a subfamília *Panicoideae*, tribo *Andropogoneae*, subtribo *Tripsacinae*, gênero *Tripsacum* *Zea* e espécie *Zea mays*.

O milho é originário da América Central ou do México, porém a sua origem biológica exata ainda é um mistério, apesar de existirem vários estudos com milho (NASCIMENTO, 2012). Contudo Fornasiere Filho (2007) enumera três hipóteses prováveis de origem do milho: 1) hipótese da “evolução divergente” 2) hipótese do “milho como antepassado do teosinte” e 3) hipótese da “descendência do teosinte”.

A cultura encontra-se disseminado em todos os continentes em escala comercial, resultando em cultivares adaptadas a climas de dias longos como na Dinamarca, por exemplo, (55° a 58° N) e a fotoperíodo de dias curtos como ocorre com cultivares equatoriais sul-americanas (GUIMARÃES, 2007). Segundo ele a produtividade média do milho em regiões de latitudes elevadas excede a dos trópicos em mais de quatro vezes.

Para Magalhães et al. (1995) os tipos de raízes presentes no milho são: primárias ou seminais, adventícias ou de suporte, destacando que estas podem absorver efetivamente fósforo e talvez outros nutrientes, contudo ele avalia que o desenvolvimento radicular crescimento em extensão é muito influenciado pelo suprimento de carboidratos produzidos e acumulados nas partes aéreas da planta.

A planta possui de 5 a 48 folhas que são arranjadas alternadamente ao colmo através de suas bainhas com o limbo foliar tendo posição quase horizontal ou vertical em relação a ele. Para o milho, o potencial de produção é definido precocemente, ou seja, por ocasião da emissão da 4ª folha, podendo se estender até a 6ª folha (FANCELLI & DOURADO NETO, 2000). Deve-se ressaltar que o auto-sombreamento provocado pelo arranjo das folhas e a presença do pendão, que fica inativo logo após a fertilização, diminuem a eficiência das folhas em até 19% (MAGALHÃES et al., 1995).

Fancelli (1988) cita que a destruição de 25% da área foliar do milho em sua porção terminal, próximo à etapa do florescimento, é responsável pela redução de 32% da produção.

Segundo Magalhães et al. (1995) geralmente o florescimento da planta ocorre entre 50 a 100 dias após o plantio e a fertilização das flores entre 12 e 36 horas após a polinização. O autor destaca que depois de fertilizada, a espiga continua a crescer até que seus grãos atinjam um estágio máximo de desenvolvimento denominado de bolhas d'água, onde a espiga atinge seu comprimento e diâmetro máximo.

Para Pereira Filho (2003) a produtividade de uma lavoura de milho depende do potencial genético da semente e das condições edafoclimáticas de onde está instalado o cultivo, além do manejo da lavoura e observa que, de modo geral, a cultivar é responsável por 50% do rendimento final.

Segundo Searsbrook e Boss (1973) o milho, enquanto planta C4, não satura suas folhas em condições de campo, mesmo sob elevadas intensidades de radiação, o que possibilita efeitos positivos na produtividade.

Fornasiere Filho (2007) relata que o desenvolvimento da cultura do milho é prejudicado por solos com altos níveis de compactação, drenagem deficiente e sujeitos a alto regime pluvial, podendo o excesso de água no solo ocasionar problemas de aeração como hipoxia (baixa pressão de oxigênio) e anoxia (ausência de oxigênio). Porém, o milho se adapta a uma ampla variedade de solos em geral solos profundos e que possibilite um adequado armazenamento de água e nutrientes.

Os maiores produtores mundiais de milho verde são os Estados Unidos da América com 3.657.550 toneladas, seguidos da Nigéria e do México com uma produção de 740.000 e 672.311 toneladas respectivamente (FAO, 2012). O Brasil não figura entre os maiores produtores de milho verde a nível mundial, porém, é o terceiro maior produtor deste cereal na produção de grãos secos sendo superado apenas pelos Estados Unidos e pela China (ARAÚJO et al., 2004).

No Brasil a produção de milho verde concentra-se nos Estados de Minas Gerais, São Paulo, Goiás, Paraná, Rio Grande do Sul e Bahia (MORAES, 2010), enquanto que no Piauí, a maior produção e o consumo de milho verde estão concentrados na Grande Teresina sendo o cultivo irrigado realizado de junho a dezembro por pequenos

produtores rurais, em áreas de até 2 ha obtendo uma produtividade média de 20-25 mil espigas verdes comerciais por hectare, ou seja, de 8.000 a 10.000 kg ha<sup>-1</sup> (ROCHA, 2008).

O milho é uma das culturas de maior importância econômica e das mais estudadas devido ao seu alto potencial produtivo e suas diversas formas de utilização tanto na alimentação humana e animal, como servindo de matéria-prima para a indústria (ROCHA, 2011). Segundo este autor a produção de milho verde para consumo *in natura* é menor do que a produção de grãos, porém o seu mercado é promissor, principalmente no nordeste do Brasil.

A Secretaria de Planejamento do Estado do Piauí (SEPLAN-PI) afirma que o milho foi o produto mais comercializado em janeiro de 2013. Segundo o órgão, as exportações dos doze principais produtos do Estado renderam o equivalente a 17 milhões de reais, destes, 15 milhões corresponderam às exportações com milho (SEPLAN, 2013).

No contexto da agricultura brasileira, o milho se destaca por representar importante papel socioeconômico junto às populações de baixa renda cujo consumo atinge a ordem de 33 kg per capita ao ano (LUCENA et al., 2000).

## **2.2 Efeito do fósforo sobre rendimento do milho**

Fornasiere Filho (2007) afirma que o fósforo é um elemento essencial à nutrição das plantas e destaca que ele desempenha papel fundamental na transferência e na utilização de energia pelas plantas, além de fazer parte da constituição de uma série de compostos vitais ao metabolismo vegetal.

Para Rezende et al. (2004) na avaliação de resposta ao fósforo, além das diferenças entre solos e culturas, é necessário considerar a interferência de outros fatores como: as características e a forma de aplicação dos fosfatos, o histórico da área, o tempo decorrido após a adubação, as diferenças varietais etc. Estes autores concluíram em seus trabalhos que, de modo geral, o uso de diferentes fontes de fósforo e modo de aplicação proporcionou incrementos semelhantes na produção, distinguindo apenas em quantidade de fósforo absorvido.

Lucena et al. (2000) explicam que o fósforo ao lado do nitrogênio são os nutrientes que mais limitam a produtividade do milho, sendo mais exigente a fósforo por ocasião da formação e desenvolvimento dos grãos, e sua deficiência contribui para a formação de espigas mal formadas, tortas e com falhas, maturação retardada e desuniforme.

As crescentes produtividades de milho alcançadas no país somente são conseguidas com suprimento de P em quantidades compatíveis com a demanda da cultura e, normalmente, aplicações mais pesadas de fosfatos são requeridas (REZENDE, 2004) especialmente devido à mobilidade, já que no solo o fósforo é imóvel, ou seja, sua absorção pelas plantas se dá por difusão, portanto todo fósforo deve ser colocado no sulco de plantio (VASCONCELLOS et al., 2000).

Apesar de a maioria dos solos brasileiros apresentarem baixo teor de fósforo disponível, Fornasiere Filho (2007) destaca que as respostas a aplicação a este nutriente tem sido altas e frequentes. Segundo ele embora as exigências do milho sejam em quantidades bem menores do que as do nitrogênio e do potássio, por exemplo, as doses normalmente recomendadas são altas devido à eficiência de aproveitamento do nutriente pelas culturas anuais (20 a 30%).

No que se referem à exportação dos nutrientes nos grãos, Coelho et al. (2006) relata que o fósforo é quase todo translocado para as sementes de milho (80 a 90%), seguindo-se o nitrogênio (75%), o enxofre (60%), o magnésio (50%), o potássio (20-30%) e o cálcio (10-15%). Eles acreditam que a incorporação dos restos culturais do milho devolve ao solo grande parte dos nutrientes, principalmente potássio e cálcio, contidos na palhada.

Blanco et al. (2009) elaboraram ensaio experimental a campo testando a combinação de lâminas de irrigação e doses de fósforo obtiveram produtividades máximas de 14.369 e 11.582 kg ha<sup>-1</sup> de espigas com e sem palha, no entanto não encontraram resposta a aplicação de fósforo e atribuíram ao fato de o superfósforo triplo ser um fertilizante de alta solubilidade, promovendo alta fixação do P no solo o que reduziu a disponibilidade do nutriente para as plantas no primeiro ano de aplicação do fertilizante (NOVAIS & SMITH, 1999).

### 2.3 Efeito do nitrogênio sobre o rendimento do milho

O manejo correto dos nutrientes é essencial por minimizar as perdas de nutrientes para o ambiente e por reduzir custos de produção (FORNASIERE FILHO, 2007). Para Meira et al. (2009) o nitrogênio, por ser exigido em maior quantidade pelo milho, é o nutriente mineral que mais frequentemente limita a produtividade de grãos e que o parcelamento do adubo em coberturas beneficia a absorção do nutriente e evita desperdício principalmente por lixiviação.

Duete et al. (2008) reforça que além do nitrogênio ser o nutriente exigido em maior quantidade e o que mais influencia a produtividade do milho, é também o que mais onera o custo de produção.

Segundo Coelho (2006) ensaios realizados com milho a campo no Brasil mostram resposta generalizada da planta a adubação nitrogenada, sob diversas condições de solo, clima e sistemas, destacando que entre os nutrientes, a importância do nitrogênio e do potássio sobressai quando o sistema de produção agrícola passa de extrativa, com baixas produções por unidade de área (2.000 a 3.000 kg ha<sup>-1</sup>), para uma agricultura intensiva e tecnificada, com o uso de irrigação e produtividade de até 10.000 kg ha<sup>-1</sup>.

O período em que o nitrogênio é mais intensamente absorvido pelo milho está entre os 40 e 60 dias após a emergência, no entanto, pesquisas indicam que altas concentrações de N na zona radicular estágio de quatro a seis folhas são benéficas para promover o rápido crescimento inicial da planta e o aumento na produtividade de grãos devido ser neste estágio que ocorrem as diferenciações das várias partes da planta e a definição de sua produção potencial (MEIRA, 2009).

Vários trabalhos têm demonstrado o efeito da adubação nitrogenada sobre a produtividade de espigas para consumo verde como, por exemplo, Silva (2001), Silva (2003) e Cardoso (2010) que obtiveram produtividades, respectivamente, de 11.700, 10.900 e 21.400 kg ha<sup>-1</sup>, de espigas verdes comerciais empalhadas, nos seus estudos sobre adubação nitrogenada no milho para consumo verde.

Rocha (2008), trabalhando com diferentes variedades e densidades populacionais de milho, avaliou que genótipo e ambiente são fatores que limitam a produtividade da cultura, fazendo com que o rendimento obtido seja menor que o

esperado, e destaca que genótipo, nitrogênio, água e população de plantas são os principais fatores de produção referentes a cultura do milho.

Silva (2003) em seus estudos sobre doses de nitrogênio e densidades de plantio em milho relata que o rendimento da cultura, em resposta a esses fatores, depende de influências genótípicas e ambientais e cita trabalhos desenvolvidos por Cardwell (1992), no período de 1930 a 1979, no Estado de Minnesota, EUA, em que os referidos fatores contribuíram com 19 e 21%, respectivamente, para os acréscimos no rendimento de grãos de milho.

Basi (2013) em seu estudo com bactérias do gênero *Azospirillum brasilense* e doses de nitrogênio em cobertura na cultura do milho, encontraram resposta quadrática para as doses de N e destacam que a máxima eficiência de 11.879 kg ha<sup>-1</sup> de milho seria alcançada com a dose de 222 kg ha<sup>-1</sup> de nitrogênio.

Cardoso et al. (2010) avaliaram o efeito do nitrogênio na produtividade de espigas verdes e encontraram médias de 15.812 kg ha<sup>-1</sup> e 10.388 kg ha<sup>-1</sup> de espigas verdes com e sem palha respectivamente em diferentes cultivares, e obtiveram uma máxima produtividade de espiga verde com a cultivar AG 1051 correspondente a 17.609 kg ha<sup>-1</sup> para espiga com palha e 11.971 kg ha<sup>-1</sup> para espiga despalhada. Segundo Civardi et al. (2011) a aplicação de nitrogênio na forma de uréia incorporada ao solo propiciou uma produtividade de 2.227 kg ha<sup>-1</sup> mediante o uso da dose de 232 kg de nitrogênio por hectare.

## **2.4 Função de produção**

Função de produção é a relação física entre as quantidades utilizadas de um conjunto de insumos e as quantidades físicas máximas que se pode obter de um determinado produto (BARROS et al., 2002).

Segundo Aguiar (2005) na exploração de qualquer atividade agrícola que se destina a obtenção de um produto (milho, algodão, mamão, leite, carne etc.) é necessário à utilização de certa quantidade de recursos (terra, sementes, fertilizantes, ração, água, mão de obra, máquinas, etc.) que são combinados, a partir do conhecimento dos procedimentos técnicos disponíveis. Ele adverte que a quantidade produzida dependerá da quantidade de recursos utilizados e da eficiência das técnicas buscando sempre a obtenção da maior receita líquida possível.

De acordo com Paz et al. (2002) nos últimos anos estudos mais precisos da produção a partir da combinação dos recursos disponíveis têm sido objeto de vários estudos.

Hexem & Heady (1978) afirmam que a produção de uma cultura agrícola está condicionada a vários fatores referentes ao solo, a planta e ao clima. O termo função de produção é usualmente conceituado como a relação existente entre o rendimento das culturas e os fatores de produção, sendo o nitrogênio e a água fatores de produção preponderantes principalmente em regiões áridas e semiáridas (VALERO & MAÑAS, 1993).

Segundo Frizzone (1986) é necessária a análise de regressão para a obtenção de uma função de produção entre as variáveis independentes e uma variável dependente, segundo um modelo estatístico que possa representar esta relação, contudo algumas pesquisas podem apresentar uma relação não linear (inclusive e por exemplo) a relação entre produtividade e aplicação de água por depender de vários fatores intrínsecos ao sistema de irrigação como frequência e quantidade, método utilizado, desenvolvimento de cultura e condições climáticas.

Rezende et al. (2004) avaliaram lâminas de irrigação na definição da função de produção para cultura do milho e do feijão e observaram que se ajustou uma equação de regressão para os valores de produtividade do milho em sistema de irrigação com alta uniformidade, porém para os valores de baixa uniformidade e para cultura do feijão não foi possível o ajuste, pois os dados de produtividade versus lâmina de irrigação não seguiram qualquer tendência.

Blanco et al. (2011) estudaram lâminas de água e doses de fósforo em milho e feijão consorciados e obtiveram produtividades máximas de 10.760 e 3.400 kg ha<sup>-1</sup> para milho e feijão com as lâminas de 530 e 644 mm, respectivamente, ressaltando que a resposta as lâminas de irrigação foi quadrática para o milho e linear para feijão.

Farinelli e Lemos (2010) em seus ensaios com milho adubado com uréia encontraram máxima produtividade de grãos com a estimativa de 92 kg ha<sup>-1</sup> de N promovendo uma produtividade de 10.476 kg ha<sup>-1</sup> de grãos destacando que o modelo ajustou-se em equação de segundo grau.

Silva et al. (2005) analisaram doses de N (0, 60, 120 e 180 kg ha<sup>-1</sup>) aplicados em diferentes épocas no sistema plantio direto e concluíram que a dose de 166 kg ha<sup>-1</sup> proporcionou a máxima eficiência técnica (7.475 kg ha<sup>-1</sup>) porém a máxima eficiência econômica foi promovida com a dose de 126 kg ha<sup>-1</sup> para uma relação de 8,25 entre preço do fertilizante e preço do produto.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido no período de dezembro de 2012 a fevereiro de 2013 na área experimental do Colégio Técnico de Teresina (CTT) da Universidade Federal do Piauí, Campus Socopo, no município de Teresina, PI (05°05'21''S e 42°48'07'' W e 74 m). A região apresenta clima tropical com chuvas de verão e outono, sendo classificado de acordo com Thornthwaite e Mather (1955) do tipo C1sA'a' caracterizado como subúmido seco, megatérmico. A precipitação média anual de 1.175,8 mm concentrada nos meses de janeiro a abril, e 28,5°C de temperatura média do ar e 68,3% de umidade relativa média do ar (BASTOS & ANDRADE JÚNIOR, 2010).

O solo da área experimental é do tipo Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico, profundo, ácido e de textura franco-arenosa (EMBRAPA, 2009). A caracterização físico-química do solo da área experimental foi realizada conforme metodologia contida no manual elaborado pela Embrapa/CNPS (1997). As amostras foram coletadas *in situ* antes do preparo inicial do solo na profundidade de 0,00 - 0,20 m e conduzidas ao Laboratório de Análises de Solos da Universidade Federal do Piauí cujos resultados são apresentados nas Tabelas 1 e 2.

**Tabela 1.** Atributos químicos do solo na camada de 0,00 - 0,20 m anterior à instalação do experimento

Camada	pH	MO	P	K	Ca	Mg	H+Al	CTC	V
M	CaCl <sub>2</sub>	g dm <sup>-3</sup>	mgdm <sup>-3</sup>	mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>					%
0,00-0,20	4,7	8,5	7,5	0,9	9,5	2,5	22	34,9	37

Análises realizadas conforme metodologias descritas pela EMBRAPA (1997).

**Tabela 2.** Atributos físicos do solo na camada de 0,00 - 0,20 m anterior à instalação do experimento

Camada	Argila <sup>1</sup>	Silte <sup>1</sup>	Areia <sup>1</sup>			Ds <sup>2</sup>	MP <sup>3</sup>	Pt <sup>4</sup>
			Fina	Grossa	Total			
M	g kg <sup>-1</sup>			kg m <sup>-3</sup>		%		
0,00-0,20	70	30	630	280	900	1590	16,90	38,20

<sup>1</sup>Granulometria pelo Método da pipeta; <sup>2</sup>Densidade do solo (Ds); <sup>3</sup>microporosidade (MP) e <sup>4</sup>porosidade total (Pt).

O preparo do solo consistiu de uma aração e duas gradagens a uma profundidade aproximada de 0,25 m. Foram abertos sulcos com 0,2 m de profundidade e espaçados entre si 0,8 m para a realização da adubação. A Figura 1 ilustra a área experimental após o preparo do solo com sulcos de plantio no espaçamento adotado destacando a adubação no fundo do sulco de plantio.



**Figura 1.** Detalhe dos sulcos de plantio na área experimental. Fonte: ALVES, K.S. (2012)

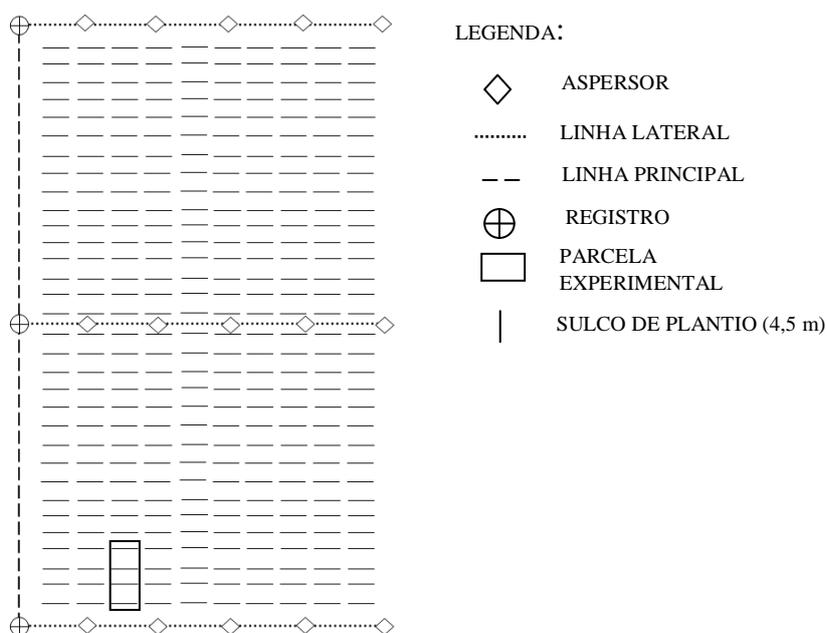
A adubação potássica foi realizada de acordo com a análise do solo aplicando-se  $90 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{K}_2\text{O}$  em todas as parcelas, dividida em duas aplicações: a metade aplicada no plantio e o restante no estágio de quatro a cinco folhas definitivas totalmente expandidas, o que aconteceu por volta de 20 dias após a emergência das plantas.

O nitrogênio e o fósforo foram aplicados de acordo com os tratamentos que consistiram da combinação de cinco doses de nitrogênio e quatro de fósforo tendo como fonte uréia e superfosfato simples (SS), respectivamente. A adubação nitrogenada correspondeu a níveis equivalentes a 0; 75; 150; 225 e  $300 \text{ kg ha}^{-1}$ . A uréia foi aplicada manualmente no fundo do sulco na adubação de fundação e a 0,20 m das fileiras das plantas, sendo incorporadas a 0,05 m de profundidade nas adubações de cobertura e dividida em três aplicações, sendo  $1/3$  da dose da adubação no plantio,  $1/3$  em cobertura aplicada no estágio de quatro a cinco folhas totalmente expandidas e  $1/3$  no estágio de oito a dez folhas totalmente expandidas.

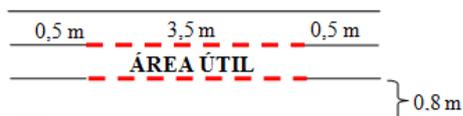
A adubação fosfatada correspondeu a quatro níveis equivalentes a 0; 80; 160 e  $240 \text{ kg ha}^{-1}$  utilizando como fonte de fósforo o superfosfato simples (SS) aplicado todo por ocasião do plantio de acordo com os tratamentos.

Foram plantadas seis sementes por metro linear com o objetivo de atingir uma população final de 42.000 plantas por hectare após o desbaste, que foi realizado no quinto dia após a emergência deixando-se apenas uma planta por cova. O híbrido duplo comercial AG 1051 foi utilizado principalmente por ser de ciclo semiprecoce e desenvolvido para produção de grãos, silagem e milho verde e bem aceito por produtores locais para a obtenção de espigas verdes (CASTRO, 2007).

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado (DIC) com quatro repetições em esquema fatorial duplo, sendo que o primeiro fator correspondeu às doses de P e o segundo fator correspondeu às doses de N. As parcelas consistiram de 10,8 m<sup>2</sup>, sendo cada uma composta por quatro fileiras de 4,5 m espaçadas 0,8 m (Figura 2) e considerado como área útil as duas fileiras centrais, desprezando-se 0,5 m de cada extremidade (Figura 3).



**Figura 2.** Croqui da área experimental destacando a parcela experimental



**Figura 3.** Detalhe da área útil na parcela experimental

Foram realizadas capinas manuais e periódicas durante todo o ciclo da cultura bem como aplicação de inseticida com modo de ação de contato e ingestão, recomendado

para o controle de pragas com princípio ativo deltametrina sendo aplicado na dosagem de 10 mL para cada 20 L.

A irrigação foi realizada por um sistema de irrigação por aspersão convencional fixo, com aspersores espaçados de 12 m, funcionando com três linhas laterais de 54 m de comprimento, 32 mm de diâmetro nominal com emissores de vazão de  $597 \text{ L h}^{-1}$  funcionando a uma pressão de 20 mca.

A água utilizada para irrigação foi recalcada de um reservatório com capacidade para  $100 \text{ m}^3$  localizado a 50 m da área experimental, sendo proveniente de um poço tubular e classificada como  $\text{C}_2\text{S}_1$  (UCCC, 1974). A frequência de irrigação foi diária e a lâmina de irrigação foi baseada nos valores de evapotranspiração da cultura ( $\text{ETc}$ ), calculada com base no coeficiente de cultivo ( $\text{Kc}$ ). O manejo com a irrigação e as capinas deram suporte a perfeito estabelecimento da cultura a campo como mostra a Figura 4.



**Figura 4.** Vista da área experimental com a cultura estabelecida, CTT, Teresina - PI  
Fonte: ALVES, K. S. (2012)

As colheitas foram realizadas manualmente, colhendo-se todas as espigas da área útil quando atingiram o ponto de milho verde. O ponto de milho verde é o estágio em que 50% das espigas da área considerada atingiram o estágio de grãos leitoso com cerca de 70% a 80% de umidade (Cardoso et al, 2011), neste trabalho o ponto de milho verde ocorreu entre 64 e 70 dias após a semeadura, segundo. As espigas foram colhidas, identificadas por tratamento e armazenadas em sala a temperatura ambiente de maneira a manter a umidade ideal recomendada para espigas verdes.

Mensuraram-se os dados referentes às variáveis: rendimento de espigas comerciais ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) e número de espigas comerciais ( $\text{esp ha}^{-1}$ ). Para efeito de classificação, as espigas empalhadas maiores que 21 cm de comprimento e 5 cm de diâmetro são padrões para serem consideradas comerciais tendo em vista a comercialização em porcentagem de espigas comerciais e peso de espigas comerciais (MOREL FREIRE et al., 2010).

O rendimento de espigas comerciais foi obtido a partir da massa das espigas comerciais colhidas na área útil da parcela, sendo o peso da espiga aferida em uma balança digital com precisão de 0,1 g e o número de espigas comerciais foi obtido a partir da quantidade de espigas colhidas na área útil. Os valores encontrados em cada parcela foram extrapolados para um hectare.

Os dados foram analisados pelo teste de regressão polinomial sendo determinada a curva de resposta para cada variável estudada. Neste experimento, os fatores de produção: fósforo (P) e nitrogênio (N) constituíram-se nas variáveis independentes e como variáveis dependentes o rendimento de espigas comerciais ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) e o número de espigas comerciais ( $\text{esp ha}^{-1}$ ).

Para obtenção das funções de produção, foram testados, para cada variável, dez modelos estatísticos que, de acordo com Hexem e Heady (1978), mostraram-se bastante satisfatórios a partir de pesquisas de campo para representar uma função de produção de uma cultura. Dentre estes modelos testados a partir de análise de regressão em planilha eletrônica do Microsoft Office Excel 2007 foi escolhido àquele que melhor se ajustou aos dados do experimento, tendo em vista os coeficientes de determinação  $r^2$ , o valor do teste F da análise de variância, os valores do teste T para todos os coeficientes e os sinais das variáveis dos modelos analisados. Os modelos estatísticos testados são apresentados a seguir.

$$\hat{Y} = b_0 + b_1P + b_2N + b_3P^{0,5} + b_4N^{0,5} + b_5P^{0,5}N^{0,5} + ei \quad (01)$$

$$\hat{Y} = b_0 + b_1P + b_2N + b_3P^{0,5} + b_4N^{0,5} + b_5PN + ei \quad (02)$$

$$\hat{Y} = b_0 + b_1P + b_2N + b_3P^{0,5} + b_4N^{0,5} + ei \quad (03)$$

$$\hat{Y} = b_0 + b_1P + b_2N + b_3P^2 + b_4N^2 + b_5PN + ei \quad (04)$$

$$\hat{Y} = b_0 + b_1P + b_2N + b_3P^2 + b_4N^2 + ei \quad (05)$$

$$\hat{Y} = b_0 + b_1P + b_2N + b_3P^{1,5} - b_4N^{1,5} + b_5PN + ei \quad (06)$$

$$\hat{Y} = b_0 + b_1P + b_2N - b_3P^{1,5} - b_4N^{1,5} + ei \quad (07)$$

$$\hat{Y} = b_0 + b_1P + b_2N + b_3P^{1,5} - b_4N^{1,5} + b_5P^{1,5}N^{1,5} + ei \quad (08)$$

$$\hat{Y} = b_1P + b_2N - b_3P^2 - b_4N^2 + b_5PN + ei \quad (09)$$

$$\hat{Y} = b_1P + b_2N - b_3P^2 - b_4N^2 + ei \quad (10)$$

Em que:

$\hat{Y}$ : rendimento da cultura do milho ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) ou número de espigas comerciais empalhadas por hectare;

P: fator doses de fósforo, em  $\text{kg ha}^{-1}$ ;

N: fator doses de nitrogênio, em  $\text{kg ha}^{-1}$ .

O Produto Físico Marginal (PMg(f)) de um insumo representa o acréscimo no rendimento ao se utilizar uma unidade a mais do fator considerado, quando se mantém constante os demais fatores, e foi obtido através da derivada primeira da função que representa o rendimento, em relação ao fator considerado sendo representado pela equação geral:

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

Em que:

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 físicos marginais:

- Produto físico marginal do nitrogênio para as diferentes doses aplicadas de fósforo;
- Produto físico marginal do fósforo para as diferentes doses de nitrogênio.

Os gráficos de isoquantas foram elaborados para os parâmetros: rendimento de espigas comerciais ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) e número de espigas comerciais empalhadas por hectare. Uma isoquanta é uma curva que mostra diferentes combinações de fatores que produzem o mesmo nível de produto, ou seja, uma linha em que as combinações de doses de nitrogênio e fósforo indicam o mesmo rendimento de milho, sendo obtida a partir de uma função de produção.

A Taxa Marginal de Substituição (TMS) do fator nitrogênio pelo fator fósforo corresponde à quantidade do fator N que se dispõe a abandonar para empregar uma unidade a mais do fator fósforo, mantendo-se o mesmo nível de produção. A TMS foi obtida pela relação entre o produto físico marginal do nitrogênio e o produto físico marginal do fósforo e pode ser representada pela equação geral:

$$\text{TMS} = \frac{\text{PMgP}}{\text{PMgN}} \quad (12)$$

Em que:

TMS<sub>(N/P)</sub>: taxa marginal de substituição do fator nitrogênio (N) pelo fator fósforo (P);

PMgN: produto marginal do fator nitrogênio;

PMgP: produto marginal do fator fósforo.

A região de produção racional situa-se entre as duas linhas de fronteiras onde os fatores comportam-se como substitutos sendo obtida pela análise das curvas de isoprodutos e delimita a área em que a atividade é economicamente viável.

A partir das funções de produção foram determinados: o produto físico marginal das doses de P e N, as doses de P e N que maximizaram o rendimento e o número de espigas, e as doses de P e N que proporcionaram a máxima receita líquida. Neste

trabalho, para a realização da análise econômico-financeira foi utilizado o preço de espiga de milho com palha (em R\$ kg<sup>-1</sup>) e o preço do N e do P (em R\$ kg<sup>-1</sup>), que tiveram como base os preços médios praticados no mercado da cidade de Teresina-PI, para o mês de fevereiro de 2013. Foram considerados os preços do milho em R\$ kg<sup>-1</sup> e em R\$ espiga<sup>-1</sup> de 1,05 e 0,35, respectivamente.

Os custos fixos relativos ao cultivo de milho verde irrigado foram estimados com base no período de recuperação de capital investido. Este critério determina que os custos fixos correspondam ao valor de uma anuidade referente ao pagamento necessário para quitar o capital utilizado no investimento em um determinado tempo com uma determinada taxa de juros sobre o capital, sendo este tempo igual à vida útil dos equipamentos, conforme a seguinte expressão:

$$CF = I_0 \times FRC \quad (13)$$

Em que:

CF: custo fixo anual dos investimentos no sistema de irrigação e na terra (R\$ ha<sup>-1</sup>);

I<sub>0</sub>: investimento no sistema de irrigação e na terra (R\$ ha<sup>-1</sup>);

FRC: fator de recuperação do capital.

O fator de recuperação de capital foi estimado pela equação:

$$FRC = \frac{(1 + j)^n \times j}{(1 + j)^n - 1} \quad (14)$$

Em que:

j: taxa real anual de juros (decimal);

n: número de anos para quitar o investimento ou vida útil dos equipamentos.

Para fins de estimativa dos custos fixos considerou-se como investimento o valor necessário para a aquisição dos equipamentos de irrigação para 1 hectare, a aquisição de 1 hectare de terra nua e a construção da casa do conjunto motobomba. O valor de investimento foi de R\$ 4.900,00, sendo R\$ 2.800,00 referente ao sistema de irrigação, R\$1.600,00 referente ao preço da terra nua e 500,00 corresponde a casa do conjunto motobomba. A taxa real anual de juros utilizada foi de 12% ao ano, considerando-se,

que os equipamentos teriam uma vida útil de 15 anos, sendo zero o seu valor residual ao final de sua vida útil.

O custo mínimo foi obtido a partir da combinação das doses de fósforo e nitrogênio que proporcionam o menor custo, para um determinado nível de rendimento. Essa combinação é aquela em que a reta do isocusto ( $C = N \cdot P_N + P \cdot P_P$ , que ao se fazer  $P = f(N)$  tem-se  $d_N/d_P = (C/P_N) - (P_P/P_N)P$ ) tangencia a isoquanta para o nível de rendimento considerado, ou seja, a inclinação da isoquanta é igual a inclinação do isocusto, devendo portanto satisfazer a condição:

$$TMS_{N/P} = -P_P/P_N \quad (15)$$

Em que:

$TMS_{N/P}$ : taxa marginal de substituição de N por P, que é a inclinação da isoquanta;

$P_P$ : preço do  $P_2O_5 = 5,80 \text{ R\$ kg}^{-1}$ ;

$P_N$ : preço do nitrogênio =  $3,80 \text{ R\$ kg}^{-1}$ ;

$P_P/P_N$ : inclinação do isocusto.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Efeito da adubação fosfatada e nitrogenada

#### 4.1.1 Rendimento

Na Tabela 3 são apresentados os valores médios de rendimento de milho verde em função das doses de nitrogênio e fósforo que foram obtidos a partir dos dados apresentados no Anexo 3, com as doses de nitrogênio variando de 0 a 300 kg ha<sup>-1</sup> e as doses de fósforo variando de 0 a 240 kg ha<sup>-1</sup>. Segundo os valores da Tabela 3, as produtividades médias variaram em até 89% com um rendimento mínimo de 911 kg ha<sup>-1</sup> e máximo de 8.500 kg ha<sup>-1</sup>, para as combinações P0N0 e P1N2, respectivamente.

Verifica-se que o rendimento teve comportamento polinomial obtendo resposta quadrática a aplicação de N com médias variando de 1.787,41 a 7.775,51 kg ha<sup>-1</sup>, um incremento correspondente a 77% na produtividade.

**Tabela 3.** Valores médios do rendimento de milho verde (kg ha<sup>-1</sup>) em função de doses de nitrogênio e fósforo

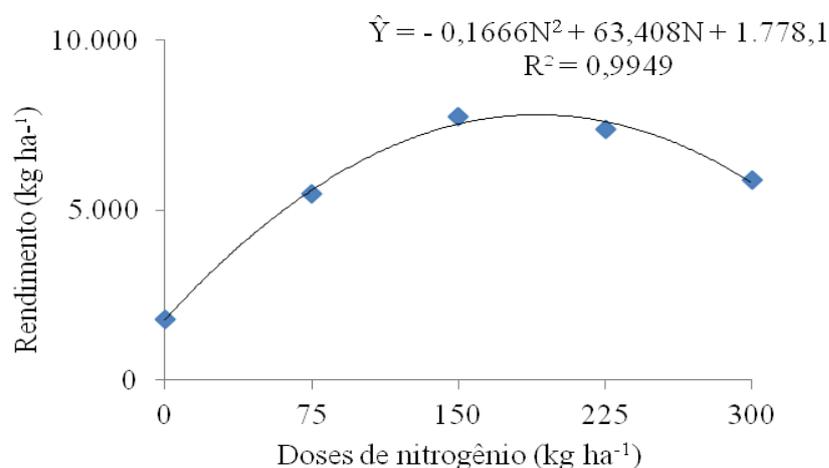
		DOSES DE NITROGÊNIO (kg ha <sup>-1</sup> )					
DOSES DE FÓSFORO (kg ha <sup>-1</sup> )		N0	N1	N2	N3	N4	Médias
		0	75	150	225	300	
P0	0	911,56	5.755,10	7.862,24	7.255,10	4.979,59	5.352,719
P1	80	1.122,45	4.836,73	8.500,00	6.678,57	5.581,63	5.343,876
P2	160	2.544,22	6.500,00	8.000,00	7.367,34	7.040,81	6.290,474
P3	240	2.571,43	4.908,16	6.739,79	8.285,71	5.908,16	5.682,651
MÉDIAS		1.787,41	5.500,00	7.775,51	7.396,68	5.877,55	

Na Tabela 4 é apresentado o resumo da análise de variância do rendimento do milho verde em função da adubação fosfatada e nitrogenada. A análise mostrou que as doses de nitrogênio tiveram efeito significativo ao nível de 5% sobre o rendimento do milho verde, porém não foi observado efeito significativo da adubação fosfatada sobre esta variável. A interação não se apresentou significativa entre os fatores: doses de fósforo e doses de nitrogênio ao nível de 5% de probabilidade.

**Tabela 4.** Resumo da análise de variância do rendimento do milho verde em função das doses de nitrogênio e fósforo, em kg ha<sup>-1</sup>

FV	GL	SQ	QM	Prob.> Fc
Nitrogênio(N)	4	423992907	105998226	0,0000
Fósforo(P)	3	14248686	4749562	0,6484
Interação NxP	12	25166388	2097199	0,9949
Resíduo	60	515766934	8596115	
TOTAL	79	979174917		

A análise de regressão para rendimento do milho verde em função das doses de nitrogênio mostrou efeito polinomial quadrático para a variável (Figura 5). A equação que melhor se ajustou apresentou coeficiente de determinação  $r^2$  de 0,995 indicando que 99,4% da variação do rendimento do milho em função das doses de nitrogênio são explicados pela equação. A equação permitiu estimar a produtividade física máxima em 7.811,37 kg ha<sup>-1</sup> obtida com a aplicação de 190,22 kg de N ha<sup>-1</sup>.

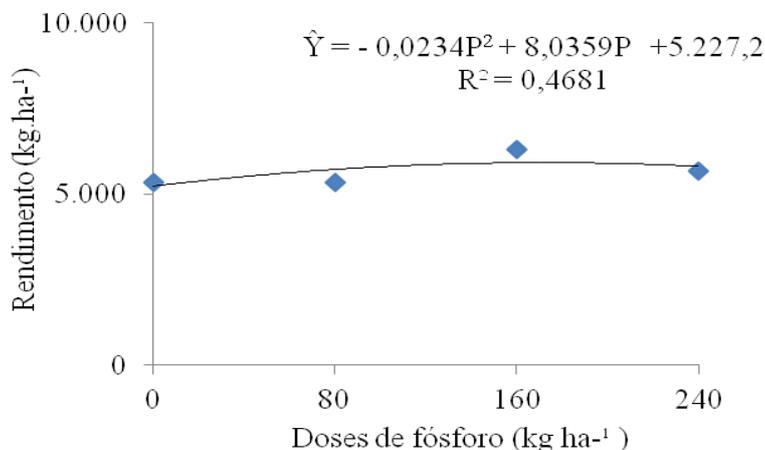


**Figura 5.** Rendimento do milho verde (kg ha<sup>-1</sup>) em função das doses de nitrogênio.

A dose de nitrogênio encontrada neste trabalho (190 kg de N) é superior ao valor encontrado por Amado et al. (2002), segundo os quais a recomendação de nitrogênio para uma produtividade esperada de 9.000 kg está em torno de 160 kg ha<sup>-1</sup>. Vasquez et al. (2012) conseguiram resultados semelhantes ao avaliarem doses de N em cobertura (0, 30, 60 e 120 kg ha<sup>-1</sup> de N) obtendo, com uma dose de 120 kg ha<sup>-1</sup> de N, uma produtividade máxima de 7.592 kg ha<sup>-1</sup>, contudo ressaltaram que a resposta da cultura a aplicação de N, naquele estudo, foi linear.

Em estudo para avaliar a produção de milho verde em função de adubação nitrogenada (0, 50, 100 e 200 kg ha<sup>-1</sup> de N) e densidades de plantio Cardoso et al. (2007) encontraram uma produtividade média de 10.165 kg ha<sup>-1</sup> com a utilização de uma dose de 151 kg ha<sup>-1</sup> de N, sendo a metade aplicada no plantio e a outra metade por ocasião da sexta folha. Coelho et al. (2006) afirmam que, para a obtenção de elevadas produtividades, essa recomendação pode variar de 40 a 80 kg de N ha<sup>-1</sup> para o milho de sequeiro, e de 100 a 150 kg ha<sup>-1</sup> para milho verde irrigado devido a utilização de alta tecnologia.

A análise de regressão para o efeito das doses de fósforo sobre o rendimento do milho verde (Figura 6) não mostrou efeito significativo a 5% de probabilidade e constatou que o modelo polinomial quadrático foi o que melhor se ajustou aos dados. A equação apresentou um coeficiente de determinação  $r^2$  de 0,4681. Blanco et al. (2011) estudando o efeito de lâminas de irrigação e doses de fósforo em milho verde e feijão - caupi consorciados também não encontraram resposta quadrática dessas culturas a fósforo e atribuiu essa ausência de resposta ao fato do teor de P no solo estar situado dentro da faixa recomendada.



**Figura 6.** Rendimento do milho verde (kg ha<sup>-1</sup>) em função das doses de fósforo.

De acordo com a Figura 4, a equação de regressão estimou o máximo rendimento do milho em função das doses de fósforo em 5.928,75 kg ha<sup>-1</sup> a ser alcançado com a aplicação de 174,67 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Essa dose foi superior a recomendação para a cultura que é 120 kg ha<sup>-1</sup>. A produtividade de 5.928,75 kg ha<sup>-1</sup> também é superior, mas próximo, a alcançada por Barreto et al. (2002) que conseguiram rendimento de grãos de 4.260 kg ha<sup>-1</sup> com aplicação de 134 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> por hectare, estudando doses de fósforo e modo de aplicação em milho.

Por outro lado Lucena et al. (2000) encontraram resposta quadrática do milho ao fósforo ao estudarem adubação nitrogenada no rendimento do milho grão. Os autores verificaram que o máximo rendimento físico da cultura foi estimado em 2.258 kg ha<sup>-1</sup> sendo atingido com a dose de 197,6 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> por hectare.

#### 4.1.2 Número de espigas

O número de espigas aumentou de forma quadrática com o aumento das doses de N sendo observado maior média de espiga em N3. As doses P0 e N0 apresentaram as menores médias quando comparadas às médias com adubação adicional, evidenciando o benefício dos adubação para o desenvolvimento da cultura. Já para as médias obtidas com a aplicação de doses crescentes de fósforo observou-se uma maior quantidade de espiga quando se utilizou 160 kg ha<sup>-1</sup> de P. Conforme a Tabela 5 pode-se observar que o número de espigas aumenta com o aumento das doses de P e N até um ponto a partir do qual se observou um declínio na variável. Paiva et al. (2012) também observaram resposta quadrática do milho em função das doses de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> para as variáveis número de espigas comerciais empalhadas e peso de espigas empalhadas comercializáveis e, estimaram um rendimento máximo de 14.401 espigas empalhadas comercializáveis por hectare obtido com a aplicação de uma dose de 174,67 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.

Na Tabela 5 são apresentados os números totais de espigas comerciais em função das doses de fósforo e nitrogênio. Os valores médios de número de espigas comerciais foram obtidos a partir dos dados apresentados no Anexo 4.

**Tabela 5.** Número de espigas comerciais (esp ha<sup>-1</sup>) em função das doses de nitrogênio e fósforo.

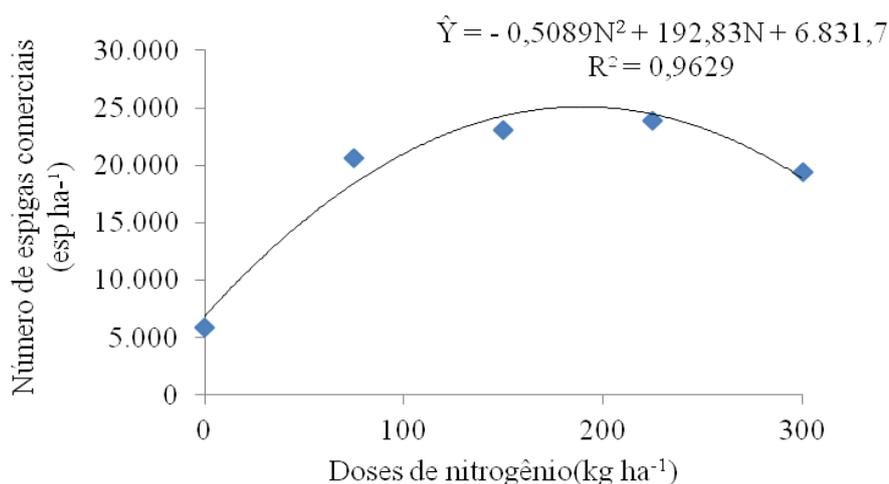
DOSES DE FÓSFORO (kg ha <sup>-1</sup> )		DOSES DE NITROGÊNIO (kg ha <sup>-1</sup> )					Médias
		N0	N1	N2	N3	N4	
		0	75	150	225	300	
P0	0	3.401,36	22.448,97	23.979,58	23.979,58	15.816,32	17.925,16
P1	80	4.081,63	22.959,18	23.979,58	21.938,77	18.877,55	18.367,34
P2	160	8.163,26	20.918,36	23.469,38	22.959,18	22.448,97	19.591,83
P3	240	8.030,61	16.326,53	20.918,36	26.530,60	20.408,16	18.442,85
MÉDIAS		5.919,22	20.663,26	23.086,73	23.852,03	19.387,75	

A Tabela 6 apresenta o resumo da análise de variância do número de espigas comerciais em função da adubação fosfatada e nitrogenada que apresentou efeito significativo para doses de nitrogênio ao nível de 5% de probabilidade, contudo não revelou efeito significativo para as doses de fósforo para a variável em estudo. A análise mostrou que não houve interação entre as doses de fósforo e nitrogênio sobre o número de espigas comerciais.

**Tabela 6.** Resumo da análise de variância do número de espigas comerciais de milho, em função das doses de nitrogênio e fósforo, em kg ha<sup>-1</sup>

FV	GL	SQ	QM	Prob.>Fc
Nitrogênio (N)	4	5.012441267	1.2531103	0,0000
Fósforo (P)	3	30683146.933811	10227715.644604	0,9258
Interação NxP	12	463804460.6058	38650371.717151	0,8430
Resíduo	60	3.941451529	65690858.815098	
TOTAL	79	9.448380404		

A análise de regressão mostrou efeito significativo ao nível de 5% de probabilidade para número de espigas comerciais empalhadas em função das doses de nitrogênio. A equação apresentou um coeficiente de determinação  $r^2$  de 0,962 e estimou uma máxima produtividade física de 25.124 espigas comerciais com a aplicação de 189,76 kg ha<sup>-1</sup> de N como ilustra a Figura 7, que apresenta o número de espigas comerciais (esp ha<sup>-1</sup>) em função das doses de nitrogênio (kg ha<sup>-1</sup>).

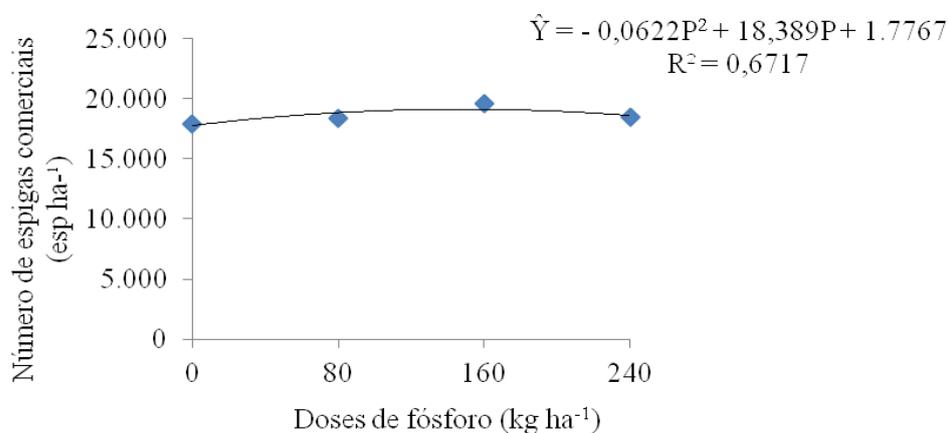


**Figura 7.** Número de espigas comerciais (esp ha<sup>-1</sup>) em função das doses de nitrogênio.

Resultados semelhantes foram encontrados por Cardoso et al. (2010) avaliando a produtividade de milho sob diferentes doses de nitrogênio (0, 50, 100, 150, 200 e 250 kg ha<sup>-1</sup> de N) encontraram rendimentos máximos para espiga com palha de 21.374

espigas verdes por hectare, obtidos com a aplicação de  $160 \text{ kg ha}^{-1}$  de N. Já Silva et al. (2003) observaram resposta linear e positiva para a variável número de espiga verde empalhada, ao estudarem efeito de adubação nitrogenada e diferentes densidades de plantio em milho na produção de milho verde e grãos. Os autores justificaram que doses maiores de nitrogênio certamente demonstrariam comportamento quadrático pela cultura.

Na Figura 8 são apresentados os valores médios de número de espigas comerciais em função das doses de fósforo. A análise de regressão não evidenciou efeito significativo para a variável número de espigas comerciais em função das doses de fósforo ao nível de 5% de probabilidade. A equação apresentou um coeficiente de determinação  $r^2$  de 0,671 e estimou uma quantidade máxima de 19.129 espigas comerciais por hectare com a aplicação de  $148,22 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$ , conforme ilustrado na Figura 6. Este resultado é menor do que os obtidos por Rocha (2008) e Cardoso et al. (2010) que registraram 33.550 e 45.694 espigas comerciais por hectare, respectivamente, tendo ambos testado o efeito da densidade de plantas em diferentes híbridos comerciais com finalidade de espigas verdes.



**Figura 8.** Número de espigas comerciais ( $\text{esp ha}^{-1}$ ) em função das doses de fósforo.

#### 4.2 Produto marginal do N e P para rendimento

As equações apresentadas no Anexo 1 e 2 expressam, respectivamente, o comportamento do rendimento e da quantidade de espigas de milho verde em função das doses de nitrogênio e fósforo. A partir dessas equações foi obtido o produto marginal de cada dose aplicada (Tabelas 7 e 8). Verifica-se que o modelo que melhor se ajustou as doses de N foi o polinomial para todas as doses aplicadas. Observou-se que os produtos marginais do nitrogênio para cada dose de  $\text{P}_2\text{O}_5$  foram maiores para as

menores doses de N, ou seja, houve decréscimo contínuo com o aumento das doses de N, até que chegasse a zero, onde ocorreu o máximo rendimento. A partir daí o produto marginal tornou-se negativo indicando que o uso das doses de N passam a ser antieconômico (Tabela 7).

**Tabela 7.** Produto marginal do nitrogênio para as diferentes doses de nitrogênio aplicadas, correspondentes a cada dose de fósforo

DOSES DE NITROGÊNIO (kg ha <sup>-1</sup> )	DOSES DE FÓSFORO (kg ha <sup>-1</sup> )			
	0	80	160	240
0	77,42	71,89	53,89	50,40
75	45,17	43,24	33,64	31,95
150	12,92	14,59	13,39	13,50
225	-19,33	-14,06	-6,86	-4,95
300	-51,58	-42,71	-27,11	-23,40

Já a análise de regressão para as doses de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> dentro das doses de N, conforme podemos observar na Tabela 8, apresentaram equações do tipo polinomial quadrático (Anexo 3) para as doses 0; 150 e 300 kg ha<sup>-1</sup> de N, mas para as doses 75 e 225 o efeito do fósforo sobre o rendimento do milho foi melhor explicado pelo modelo linear tornando-se, portanto, impraticável a constatação da dose economicamente ótima de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> para aquelas doses de N.

**Tabela 8.** Produto marginal do fósforo para as diferentes doses de fósforo aplicadas, correspondentes a cada dose de nitrogênio

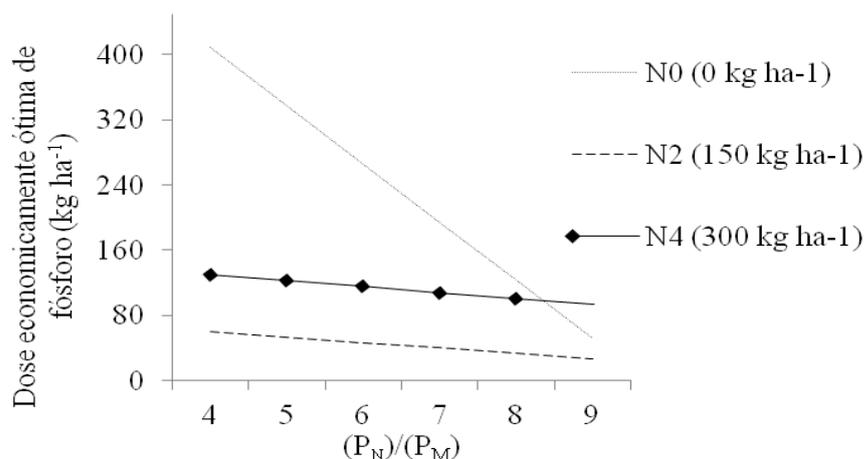
DOSES DE FÓSFORO (kg ha <sup>-1</sup> )	DOSES DE NITROGÊNIO (kg ha <sup>-1</sup> )				
	0	75	150	225	300
0	9,723	-	12,95	-	21,56
80	8,603	-	1,11	-	10,84
160	7,483	-	-10,73	-	0,12
240	6,363	-	-22,57	-	-10,6

#### 4.2.1 Doses economicamente ótimas de P e N para rendimento

As equações obtidas por meio da análise de regressão tiveram como variáveis independentes doses de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e como variáveis dependentes rendimento (em kg ha<sup>-1</sup>) e número de espigas comerciais (em esp ha<sup>-1</sup>). A partir das equações foram obtidos, por derivação, os valores dos produtos marginais do fósforo para as doses 0, 80, 160 e 240

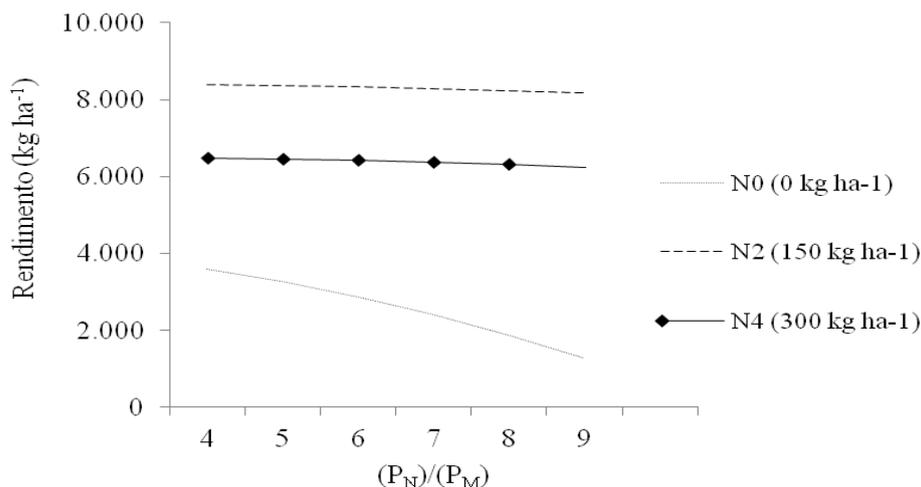
kg ha<sup>-1</sup>. Assim foi possível estimar a dose economicamente ótima para cada fator em função da relação existente entre os preços dos insumos (em R\$ kg<sup>-1</sup>) e o preço do produto (em R\$ kg<sup>-1</sup>).

A Figura 9 apresenta a relação entre as doses econômicas de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> correspondentes a cada dose de N (kg ha<sup>-1</sup>) em função da relação entre os preços do N e do milho, em R\$ kg<sup>-1</sup>. Foi observado uma maior variabilidade das doses ótimas em N0 que passou de 408,8 kg ha<sup>-1</sup> na relação de preços (P<sub>N</sub>/P<sub>M</sub>) igual a 4 para 51,6 kg ha<sup>-1</sup> na relação 9, ou seja, um variação de 88%.



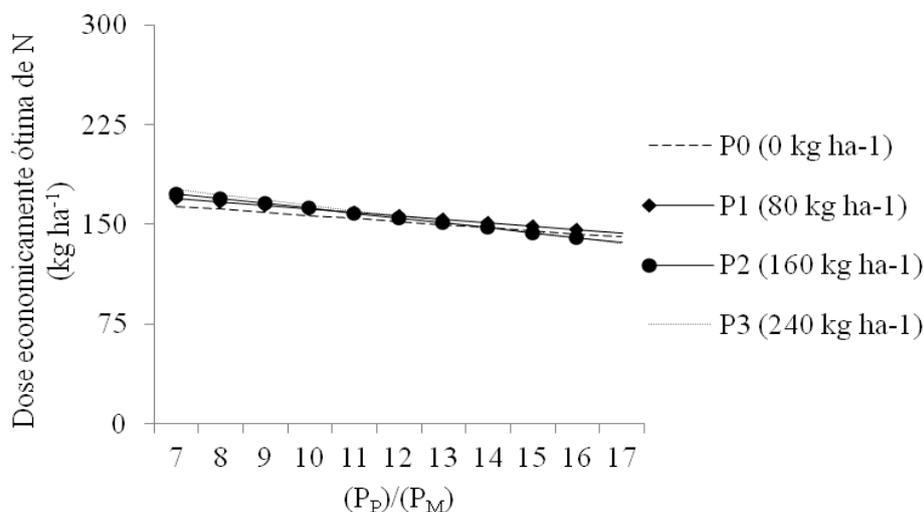
**Figura 9.** Dose de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> economicamente ótima em função da relação entre o preço do N (P<sub>N</sub>) e o preço do milho (P<sub>M</sub>)

Na Figura 10 verifica-se que a dose N0 apresentou um acentuado decréscimo da primeira relação de preços até a última considerada, ou seja, na relação de preços igual a 4 o rendimento foi de 3.585 kg ha<sup>-1</sup> enquanto que na relação 9 atingiu o equivalente a 781 kg ha<sup>-1</sup>, uma variação de 2.804 kg ha<sup>-1</sup>. Também se observa que as doses N2 e N4 registraram pouca variação com a relação P<sub>N</sub>/P<sub>M</sub> tanto das doses econômicas (40,5 e 44,8 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente) como no rendimento (4 e 5%, respectivamente).



**Figura 10.** Rendimento do milho verde a partir das doses economicamente ótimas de N em função da relação entre o preço do N ( $P_N$ ) e o preço do milho ( $P_M$ )

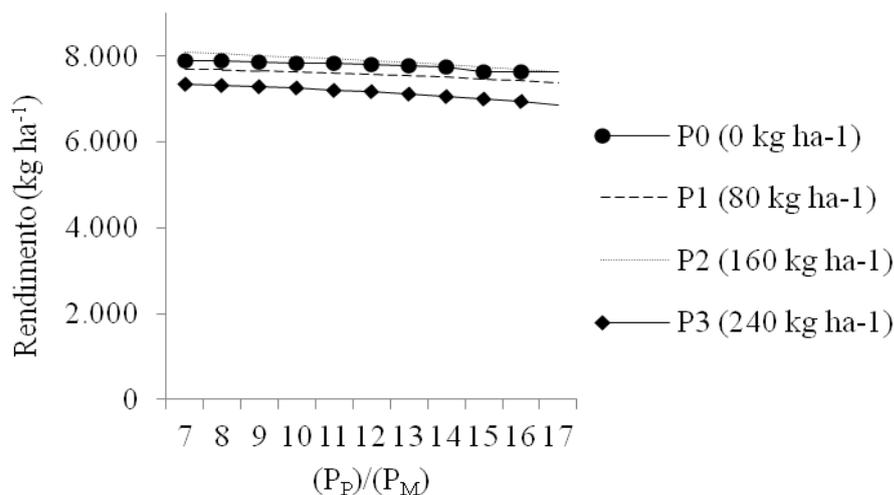
Pela Figura 11, pode-se verificar que as doses de N economicamente ótimas não tiveram grandes variações em função da relação  $P_P/P_M$ , sendo encontrado uma maior variação em P3 com 176,42 kg ha<sup>-1</sup> de N para  $P_P/P_M$  igual a 7 e 135,77 kg ha<sup>-1</sup> de N para  $P_P/P_M$  correspondente a 17, resultando em uma variação de apenas 40,65 kg ha<sup>-1</sup>.



**Figura 11.** Dose de N economicamente ótima para cada dose de fósforo em função da relação entre o preço do fósforo ( $P_P$ ) e o preço do milho ( $P_M$ )

Pela Figura 12 é possível observar que a dose P2 proporcionou um rendimento de 8.077,28 kg ha<sup>-1</sup> para uma relação  $P_P/P_M$  igual a 7, e 7.632,84 quando a relação entre  $P_P/P_M$  for de 17, ou seja, uma variação inferior a 5,5% no rendimento. Neste sentido P0, P1 e P3 também não foi observado grande variação entre o rendimento encontrado na

relação 7 e o encontrado na relação 17, encontrando valores inferiores a 4, 5 e 7%, respectivamente.



**Figura 12.** Rendimento do milho verde a partir das doses economicamente ótimas de  $P_2O_5$  em função da relação entre o preço do fósforo ( $P_P$ ) e o preço do milho ( $P_M$ )

#### 4.3 Produto marginal do N e P para número de espigas

O produto marginal do nitrogênio ( $PM_{g(N)}$ ) para as doses de N correspondentes a cada dose de  $P_2O_5$  está apresentado na Tabela 9 e observa-se que o mesmo diminui com o aumento das doses de  $P_2O_5$ . Pode-se observar um decréscimo do  $PM_{g(N)}$  com o aumento das doses de  $P_2O_5$  e que as doses de 225 e 300 kg ha<sup>-1</sup> apresentam valores negativos o que se configura como um indicativo de que a dose que maximiza o rendimento é inferior às doses referidas acima.

**Tabela 9.** Produto marginal do nitrogênio para as diferentes doses de N aplicadas, correspondentes a cada dose de fósforo

DOSES DE NITROGÊNIO (kg ha <sup>-1</sup> )	DOSES DE FÓSFORO (kg ha <sup>-1</sup> )			
	0	80	160	240
0	248,30	216,90	153,50	152,50
75	141,80	127,50	97,25	99,55
150	35,30	38,10	41,00	46,60
225	-71,20	-51,30	-15,25	-6,35
300	-177,70	-140,70	-71,50	-59,30

Para a dose N3 o modelo que melhor se ajustou foi o linear com coeficiente de determinação igual a 0,323 (Anexo 3), contudo o efeito que as demais doses

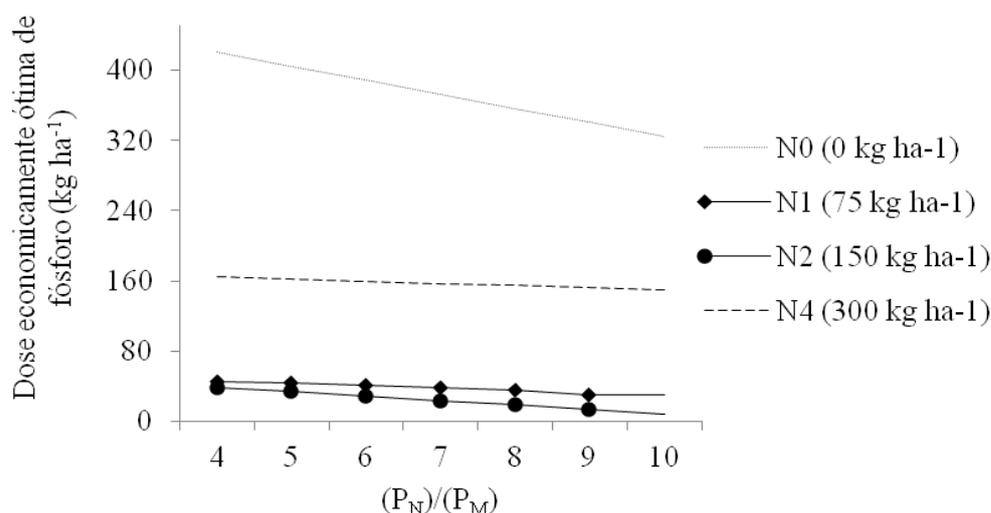
apresentaram sobre o número de espigas comerciais foi quadrático com coeficientes de 0,849; 1; 0,981 e 0,920 para N0, N1, N2 e N4, respectivamente.

**Tabela 10.** Produto marginal do fósforo para as diferentes doses de fósforo aplicadas, correspondentes a cada dose de nitrogênio

DOSES DE FÓSFORO (kg ha <sup>-1</sup> )	DOSES DE NITROGÊNIO (kg ha <sup>-1</sup> )				
	0	75	150	225	300
0	30,08	22,32	11,79	-	69,51
80	25,12	-9,52	-4,05	-	37,67
160	20,16	-41,36	-19,89	-	5,83
240	15,2	-73,2	-35,73	-	-26,01

#### 4.3.1 Doses economicamente ótimas de P e N para número de espigas

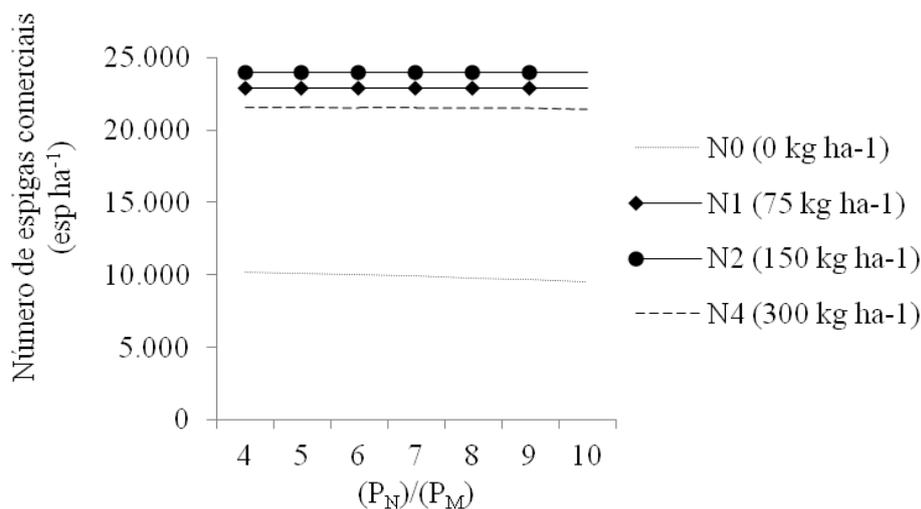
De acordo com a Figura 13 observa-se que a dose econômica de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> para N0 equivaleu a aplicação de 408,79 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (Anexo 5) e proporcionou um rendimento de 9.921,7 espigas comerciais empalhadas quando a relação entre os preços for 4. Nessa relação também se observa que a dose N1 proporcionou um rendimento de 23.013,30 espigas comerciais, conforme Anexo 8, para uma relação 4, conforme se verifica na Figura 12.



**Figura 13.** Dose de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> economicamente ótima em função da relação entre o preço do N (P<sub>N</sub>) e o preço do milho (P<sub>M</sub>)

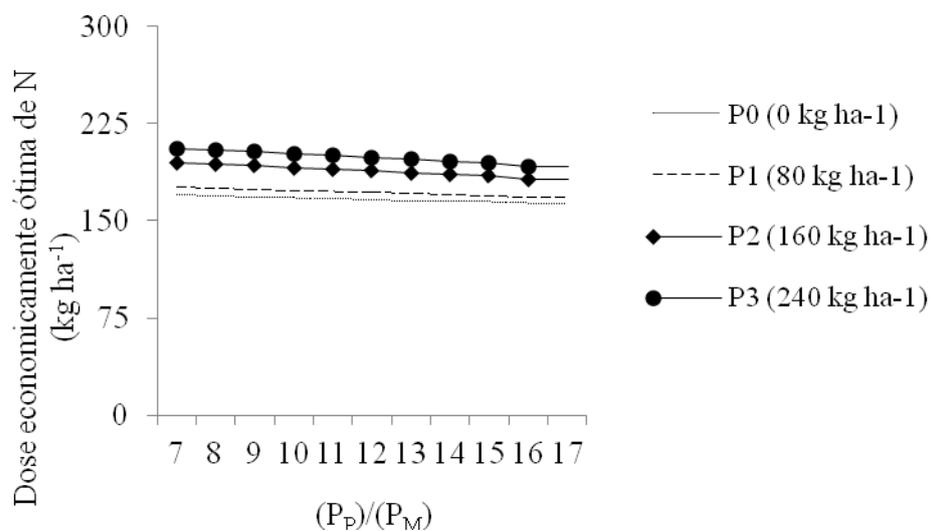
É possível visualizar na Figura 14 que N2 obteve doses econômicas superiores as demais doses proporcionando um rendimento econômico de 24.213,6 espigas comerciais quando a relação for 4, enquanto que N0 obteve 10.187,8 espigas para a

mesma relação de preços. Em média as doses de nitrogênio mantiveram o número de espigas comerciais constantes, ou seja, os números máximos econômicos de espigas comerciais correspondentes às doses de N apresentaram pequena variação ao longo das diferentes relações de  $P_N/P_M$ .



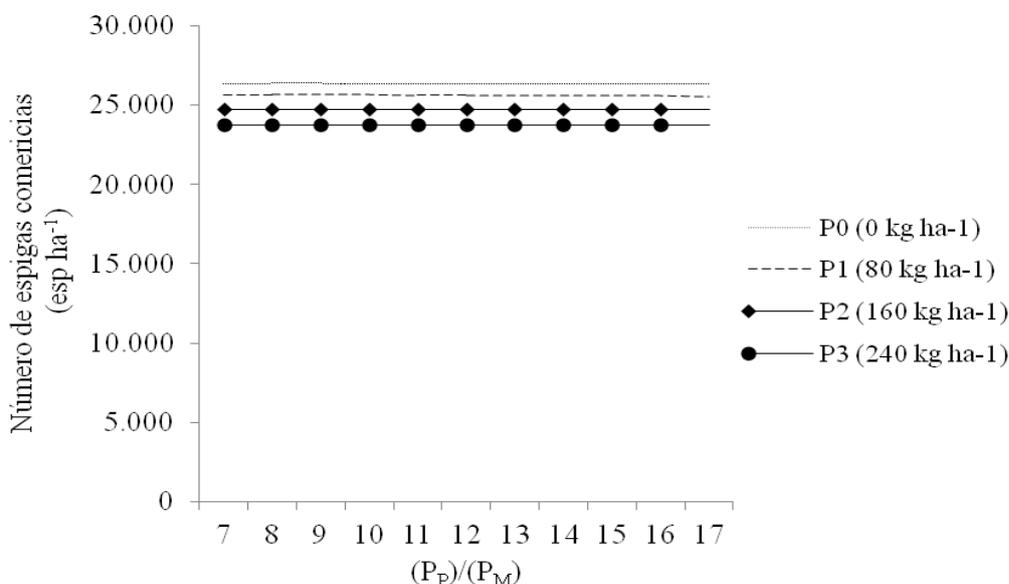
**Figura 14.** Número de espigas de milho a partir das doses economicamente ótimas de nitrogênio em função da relação entre o preço do N ( $P_N$ ) e o preço do milho ( $P_M$ )

A Figura 15 mostra que a dose econômica de N para P3 foi de 206,09 kg ha<sup>-1</sup> para a relação 7, com um rendimento de 23.912,73 espigas comerciais empalhada (Figura 16) observando-se uma diminuição gradual do rendimento em função da relação  $P_P/P_M$ .



**Figura 15.** Dose de N economicamente ótima em função da relação entre o preço do fósforo ( $P_P$ ) e o preço do milho ( $P_M$ )

Na dose P0 o rendimento de 26.350,51 espigas comerciais foi alcançado com a dose econômica de 169,93 kg ha<sup>-1</sup> de N quando a relação for 7, enquanto que em P3 23.912,73 espigas por hectare foram obtidos com 206,09 kg ha<sup>-1</sup> de N, o que correspondeu a um incremento de apenas 10% entre número de espigas em P0 e o número de espigas em P3 (Figura 16). Também se pode verificar que a quantidade de espigas comerciais decresceu com o aumento das doses, isto é, a dose P0 promoveu um maior rendimento em espigas comerciais seguido de P1, P2 e P3 (Figura 16).



**Figura 16.** Número de espigas de milho verde a partir das doses economicamente ótimas de fósforo em função da relação entre o preço do fósforo (P<sub>p</sub>) e o preço do milho (P<sub>m</sub>)

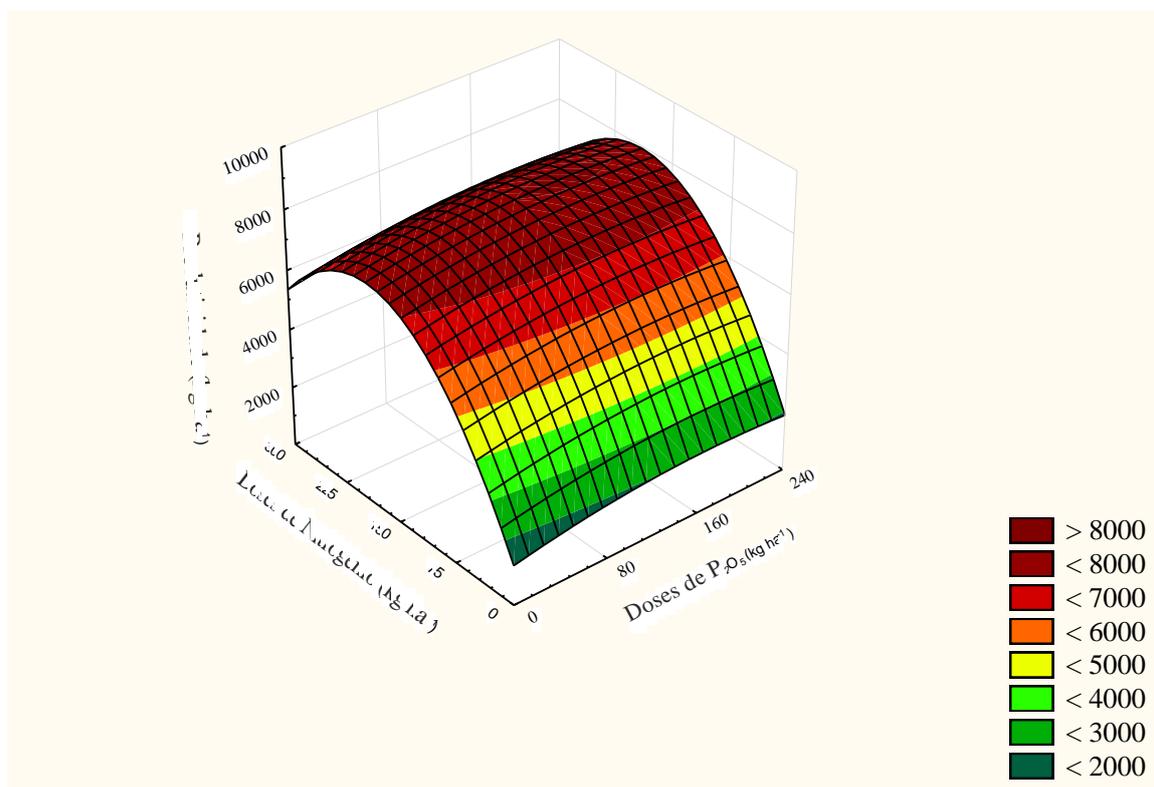
#### 4.4 Superfície de resposta do rendimento do milho verde (kg ha<sup>-1</sup>) em função das doses de P e N

A análise de regressão mostrou que todos os modelos avaliados foram significativos pelo teste F, a 5% de significância, podendo representar a produtividade do milho verde em função das doses de fósforo e nitrogênio, porém o modelo que melhor se ajustou aos dados do experimento foi o 5°. Este modelo apresenta comportamento polinomial quadrático, com intercepto e sem interação significativa entre os fatores doses de fósforo e doses de nitrogênio, conforme a equação 16.

$$\hat{Y} = 1.348,226 + 7,9496P + 63,3393N - 0,0234P^2 - 0,1666N^2 \quad (16)$$

Para o modelo escolhido o coeficiente de determinação foi de 0,891, isso significa que 89,1% da variação do rendimento do milho pode ser explicado pela variação das doses de fósforo e nitrogênio. Na Figura 17 visualiza-se a representação gráfica da função de produção estimada pelo modelo escolhido. De acordo com a figura pode-se observar que o fator nitrogênio exerce maior influência sobre o rendimento da cultura do que o fator fósforo, o que é evidenciado pela maior curvatura da linha do fator nitrogênio na superfície de resposta.

Com o modelo escolhido pôde-se estimar o máximo rendimento físico para o milho em 8.043,61 kg ha<sup>-1</sup> a ser obtido com a aplicação de 169,86 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e 190,09 kg ha<sup>-1</sup> de nitrogênio. O valor encontrado para máximo rendimento físico neste trabalho é inferior ao encontrado por Paiva et al. (2012), que obteve 14.401 kg ha<sup>-1</sup> com a aplicação de 106 e 120 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e N, respectivamente.



**Figura 17.** Superfície de resposta do rendimento do milho verde (kg ha<sup>-1</sup>) em função das doses de fósforo e nitrogênio, em kg ha<sup>-1</sup>

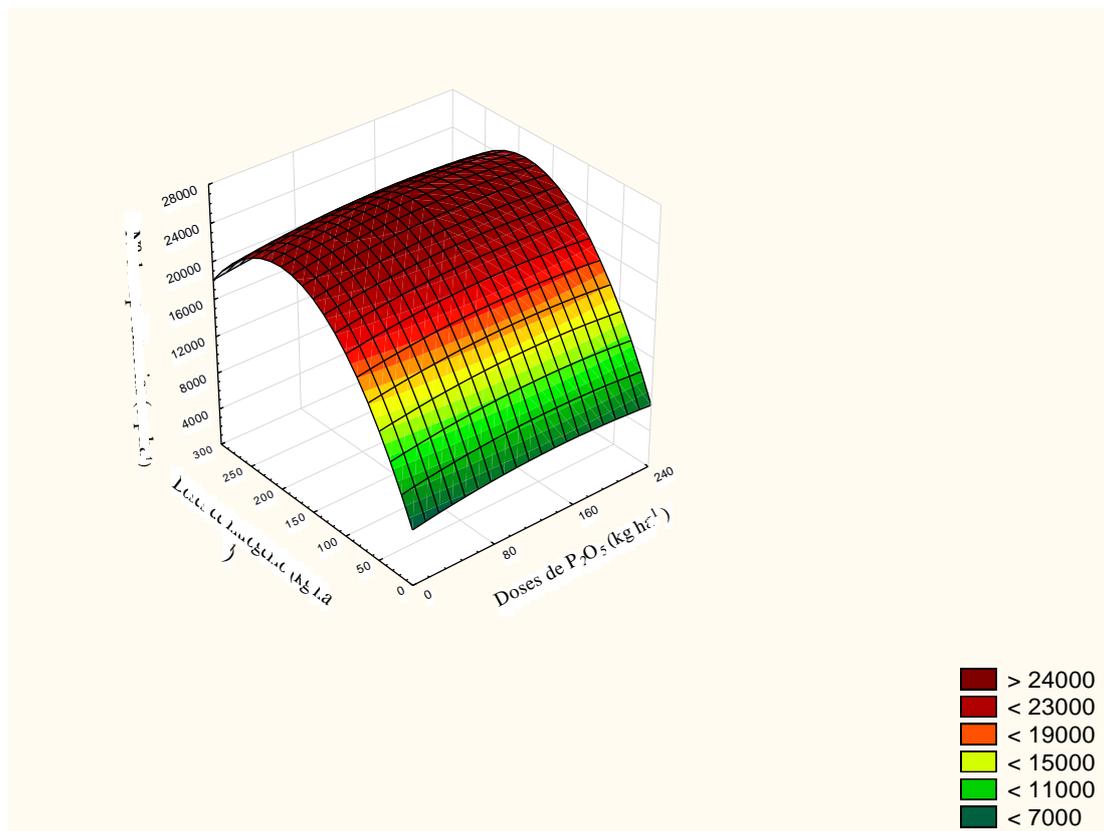
#### 4.5 Superfície de resposta do número de espigas de milho verde (esp ha<sup>-1</sup>) em função das doses de P e N

A análise de regressão para número de espigas comerciais empalhadas também mostrou que todos os modelos avaliados foram significativos pelo teste F, a 5% de significância, e que, portanto, poderiam representar o rendimento do milho (em esp ha<sup>-1</sup>) em função das doses de fósforo e nitrogênio, o modelo que melhor se ajustou aos dados foi o 5º modelo. Este modelo apresentou resposta quadrática, com intercepto e sem interação significativa entre os fatores doses de fósforo e doses de nitrogênio, conforme a equação 17.

$$\hat{Y} = 6.017,2333 + 18,3890P + 192,8337N - 0,06215P^2 - 0,50888N^2 \quad (17)$$

Os gráficos de superfície de resposta do milho a adubação nitrogenada e fosfatada foram análogos devido a maior influência exercida do fator nitrogênio em comparação ao fator fósforo, tanto no rendimento como no número de espigas comerciais. De acordo com a Figura 18 o número máximo de espigas comerciais estimado por hectare foi de 25.648,3 sendo obtido com a aplicação de 147,94 kg ha<sup>-1</sup> e 189,49 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e N, respectivamente.

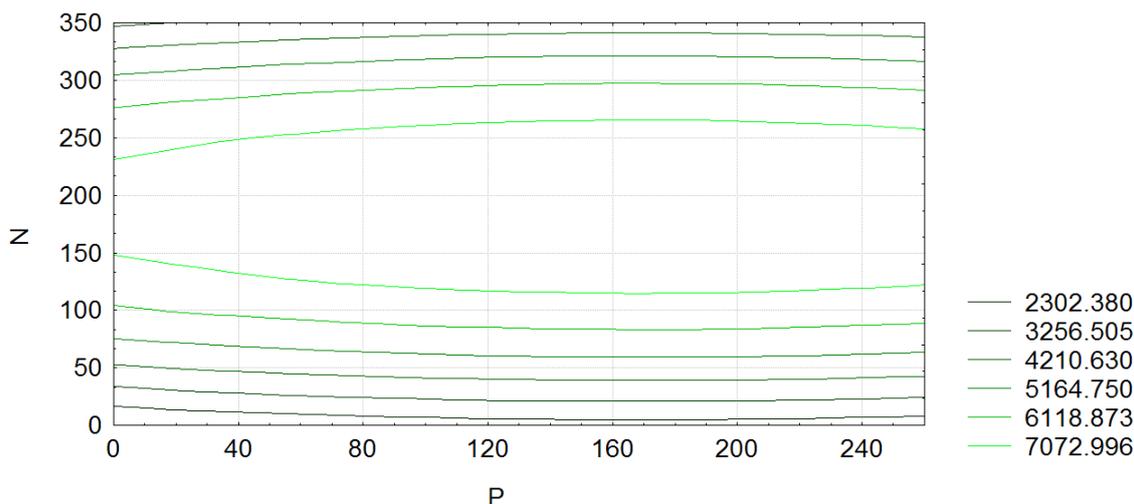
Este resultado é inferior ao encontrado por Paiva et al. (2012) que obtiveram número de espigas empalhadas comercializáveis variando de 33.929 a 60.714 espigas, com média de 47.861 espigas comerciais por hectare, no entanto corroboram com Rocha (2008) que encontrou valores para número de espigas comerciais empalhadas situados entre 20.720 a 33.550 espigas por hectare, e observou um número máximo de espiga comercial para o híbrido AG 1051 de 31.820 espigas por hectare para uma população estimado de 52.694 plantas por hectare.



**Figura 18.** Superfície de resposta do número de espigas de milho verde (esp ha<sup>-1</sup>) em função das doses de fósforo e nitrogênio, em kg ha<sup>-1</sup>

#### 4.6 Isoquantas de rendimento

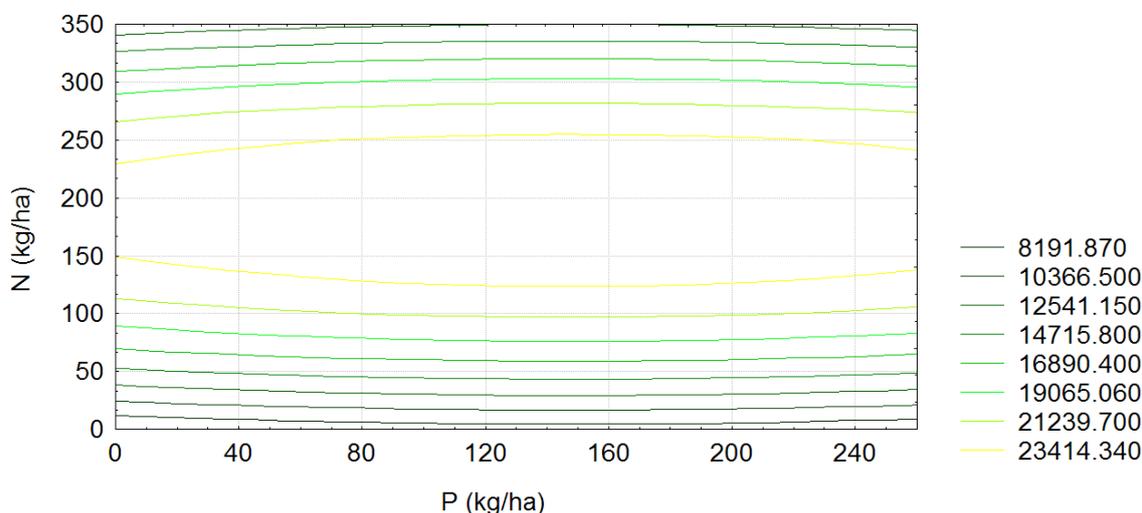
A Figura 19 mostra as isoquantas, ou curvas de isoprodutos, que foram obtidas a partir da função de produção do milho. As isoquantas demonstram que é possível obter um mesmo rendimento variando os fatores de produção em várias combinações diferentes, de forma que quanto maior o rendimento menor a quantidade de combinações que promove esse rendimento, até o ponto em que se obtém uma única combinação que corresponderá ao máximo rendimento físico da cultura que, neste trabalho foi de 8.043,61 kg ha<sup>-1</sup>. Pode-se observar na Figura 19, que o rendimento de 6.118,87 kg ha<sup>-1</sup> de milho pode ser obtido, dentre outras combinações, com a aplicação de 160 kg ha<sup>-1</sup> de fósforo e 82 kg ha<sup>-1</sup> de N, no entanto aplicando-se 40 kg ha<sup>-1</sup> de fósforo e 94 kg ha<sup>-1</sup> de N também ocasionará a obtenção do mesmo nível de rendimento.



**Figura 19.** Curvas de isoprodutos para o rendimento do milho verde ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) em função das doses de fósforo e nitrogênio, em  $\text{kg ha}^{-1}$

#### 4.6.1 Isoquantas do número de espigas

A Figura 20 apresenta os dados de curvas de isoprodutos no número de espigas por hectare em função de doses de  $\text{P}_2\text{O}_5$  e N. De acordo com os resultados é possível obter uma produtividade de 19.065 espigas comerciais por hectare utilizando-se 120 e 76  $\text{kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$  e N bem como 40 e 82  $\text{kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$  e N, respectivamente.

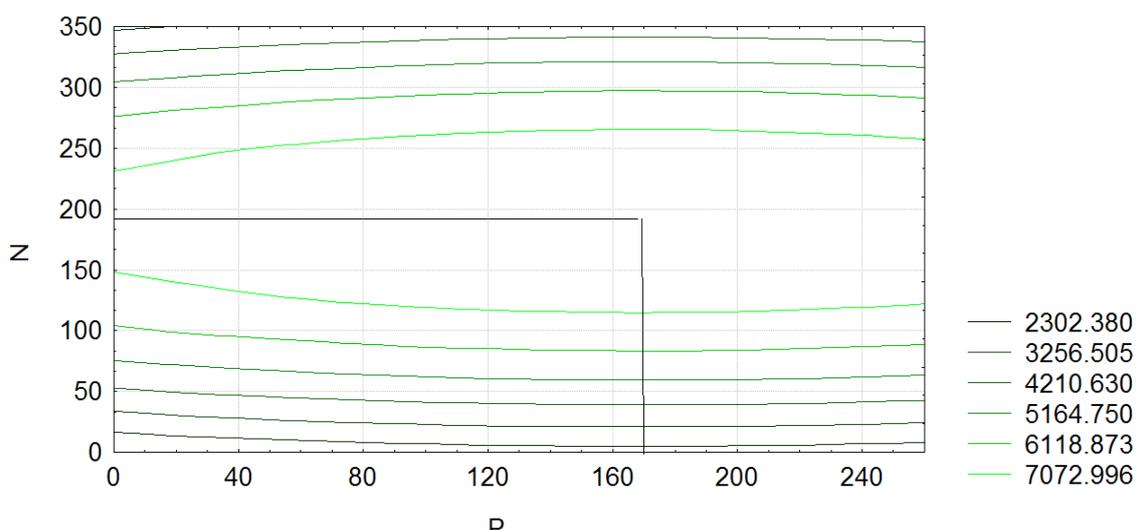


**Figura 20.** Curvas de isoprodutos para número de espigas em função das doses de fósforo e nitrogênio, em  $\text{kg ha}^{-1}$

#### 4.7 Região de produção racional de milho para rendimento

A região de produção racional de milho é a área compreendida pelas diferentes combinações entre fósforo e nitrogênio, para os níveis de rendimentos, onde a atividade

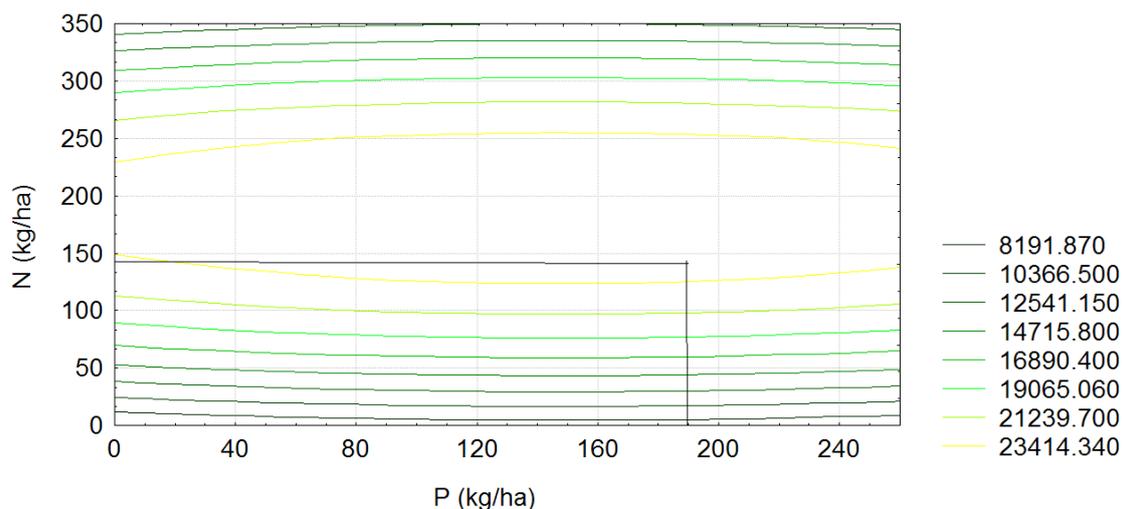
é economicamente desejável. Esta região é delimitada por linhas denominadas linhas de fronteiras que ligam os pontos em que a TMS é infinita ou zero. Na Figura 21 é apresentada a região de produção racional do rendimento do milho. Como não ocorreu a interação entre os fatores fósforo e N, a dose de  $P_2O_5$  que delimita a região de produção racional foi igual para todos os níveis de rendimento, ocorrendo o mesmo para a adubação nitrogenada em que a mesma dose delimita a região de produção racional em todos os níveis de rendimento. Os valores das doses de  $P_2O_5$  e nitrogênio que delimitam a região de produção racional são, respectivamente, 169,86 e 190,09  $kg\ ha^{-1}$  conforme ilustrado na Figura 21.



**Figura 21.** Região de produção racional do milho verde ( $kg\ ha^{-1}$ ) em função das doses de fósforo e nitrogênio

#### 4.7.1 Região de produção racional de milho para número de espigas

A Figura 22 ilustra a região de produção racional do milho em função das doses de  $P_2O_5$  e N. Na figura observa-se que as doses que delimitam a região de produção racional são 147, 94 e 189,49  $kg\ ha^{-1}$  de fósforo e N, respectivamente, propiciando um número máximo de 25.643 espigas comerciais  $ha^{-1}$ .



**Figura 22.** Região de produção racional do milho verde ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) em função das doses de fósforo e nitrogênio

#### 4.8 Produto físico marginal do P e N para rendimento

Na Tabela 11 estão dispostos os produtos físicos marginais do fósforo e do nitrogênio, respectivamente. O produto físico marginal é a quantidade aumentada no produto total ao se adicionar uma unidade de um fator variável considerado (nesse caso N ou P).

Observa-se na Tabela 11 que ao se aplicar  $80 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$  e  $150 \text{ kg ha}^{-1}$  de N, o rendimento aumenta  $4,21 \text{ kg ha}^{-1}$  para cada quilograma de fósforo aplicado e  $13,36 \text{ kg ha}^{-1}$  para cada quilograma de nitrogênio aplicado. Verifica-se que os produtos marginais do  $\text{P}_2\text{O}_5$  não variaram com as doses de nitrogênio ocorrendo o mesmo com as doses de nitrogênio. Isso pode ser atribuído a ausência de interação entre os fatores doses de fósforo e nitrogênio. A variação dos produtos físicos marginais do fósforo e do nitrogênio é decrescente, ou seja, diminui à medida que as doses de  $\text{P}_2\text{O}_5$  e de N aumentam e permanece decrescendo até atingir zero onde ocorre a máxima produtividade da cultura.

**Tabela 11.** Produto físico marginal do  $P_2O_5$  ( $kg\ ha^{-1}$ ) para as diferentes doses de  $P_2O_5$  (valor superior) e produto físico marginal do N ( $kg\ ha^{-1}$ ) para as diferentes doses de N (valor inferior)

Doses de N ( $kg\ ha^{-1}$ )	Doses de $P_2O_5$ ( $kg\ ha^{-1}$ )			
	0	80	160	240
0	7,95	4,21	0,46	-3,28
	63,34	63,34	63,34	63,34
75	7,95	4,21	0,46	-3,28
	38,35	38,35	38,35	38,35
150	7,95	4,21	0,46	-3,28
	13,36	13,36	13,36	13,36
225	7,95	4,21	0,46	-3,28
	-11,63	-11,63	-11,63	-11,63
300	7,95	4,21	0,46	-3,28
	-36,62	-36,62	-36,62	-36,62

A partir desse ponto os produtos marginais do fósforo e do nitrogênio tornam-se negativos, ou seja, não haverá incremento na produtividade mesmo com adição de insumos, configurando-se em prática antieconômica já que a obtenção da produtividade física máxima poderá ser atingida com combinações menores entre os fatores e, portanto, a adição de mais insumos acarretaria para aumentar os custos (LEFTWICH, 1976). Neste trabalho, o produto marginal do  $P_2O_5$  se igualou a zero quando a dose aplicada foi igual a  $169,86\ kg\ ha^{-1}$  e o produto marginal do nitrogênio atingiu o valor zero com a aplicação de  $190,09\ kg\ ha^{-1}$  de N.

#### 4.8.1 Produto físico marginal do P e N para número de espigas

Os produtos físicos marginais do fósforo e do nitrogênio para as doses de  $P_2O_5$  e N, respectivamente, estão relacionados na Tabela 12. De acordo com essa tabela observa-se que os produtos marginais do  $P_2O_5$  não variaram com as doses de nitrogênio ocorrendo o mesmo com as doses de nitrogênio e a variação dos produtos físicos marginais do fósforo e do nitrogênio é decrescente, ou seja, diminui à medida que as doses de  $P_2O_5$  e de N aumentam.

**Tabela 12.** Produto físico marginal do  $P_2O_5$  ( $kg\ ha^{-1}$ ) para as diferentes doses de  $P_2O_5$  (valor superior) e produto físico marginal do N ( $kg\ ha^{-1}$ ) para as diferentes doses de N (valor inferior)

Doses de N ( $kg\ ha^{-1}$ )	Doses de $P_2O_5$ ( $kg\ ha^{-1}$ )			
	0	80	160	240
0	18,39	8,52	-1,36	-11,23
	192,83	192,83	192,83	192,83
75	18,39	8,52	-1,36	-11,23
	116,50	116,50	116,50	116,50
150	18,39	8,52	-1,36	-11,23
	40,17	40,17	40,17	40,17
225	18,39	8,52	-1,36	-11,23
	-36,16	-36,16	-36,16	-36,16
300	18,39	8,52	-1,36	-11,23
	-112,49	-112,49	-112,49	-112,49

A aplicação de  $80\ kg\ ha^{-1}$  de  $P_2O_5$  e  $150\ kg\ ha^{-1}$  de N decorre no aumento de  $8,52\ kg\ ha^{-1}$  para cada quilograma de fósforo aplicado e  $40,17\ kg\ ha^{-1}$  para cada quilograma de nitrogênio aplicado. O produto marginal do  $P_2O_5$  e do nitrogênio se igualaram a zero quando a dose aplicada foi, respectivamente, de  $147,9$  e  $189,5\ kg\ ha^{-1}$ , ou seja, com essa combinação foi obtido o número máximo de espigas comerciais por hectare.

#### 4.9 Taxa marginal de substituição do N por P ( $TMS_{N/P}$ ) para rendimento

Os valores da taxa marginal de substituição (TMS) do nitrogênio por fósforo estão dispostos na Tabela 13. Estabeleceram-se intervalos de produção para obtenção de uma melhor relação entre as variáveis onde se observa, inicialmente, que a TMS assume valores negativos indicando que a substituição do N por P pode ser economicamente viável e que essa substituição é feita em proporções decrescentes. A partir do momento em que TMS se torna positiva, a substituição torna-se antieconômica, indicando que o nitrogênio está sendo substituído por P em proporções crescentes.

**Tabela 13.** Taxa marginal de substituição de N por P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (TMS<sub>N/P</sub>) e as correspondentes doses de N e P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> para níveis pré-determinados de rendimento

P kg ha <sup>-1</sup>	1.000		3.000		4.000		5.000		6.000	
	N kg ha <sup>-1</sup>	TMS								
<b>0</b>	16,50	-0,14	55,45	-0,18	79,98	-0,22	111,84	-0,30	179,08	-2,17
<b>20</b>	13,94	-0,12	52,16	-0,15	75,97	-0,18	106,30	-0,25	158,17	-0,66
<b>40</b>	11,72	-0,10	49,34	-0,13	72,58	-0,16	101,73	-0,21	147,61	-0,43
<b>60</b>	9,84	-0,09	46,97	-0,11	69,75	-0,13	98,00	-0,17	140,31	-0,31
<b>80</b>	8,29	-0,07	45,02	-0,09	67,44	-0,10	95,00	-0,13	134,96	-0,23
<b>100</b>	7,06	-0,05	43,48	-0,07	65,62	-0,08	92,67	-0,10	131,03	-0,17
<b>120</b>	6,15	-0,04	42,34	-0,05	64,28	-0,06	90,96	-0,07	128,25	-0,11
<b>140</b>	5,54	-0,02	41,58	-0,03	63,39	-0,03	89,84	-0,04	126,46	-0,07
<b>160</b>	5,24	-0,01	41,21	-0,01	62,95	-0,01	89,28	-0,01	125,59	-0,02
<b>180</b>	5,24	0,01	41,21	0,01	62,95	0,01	89,29	0,01	125,60	0,02

É importante observar que à medida que se aumenta os rendimentos, as doses de N que propiciam a viabilidade econômica também aumentam, ou seja, é necessária uma dose cada vez maior para a obtenção do rendimento econômico nos intervalos pré-estabelecidos. Na Tabela 13 pode-se observar que para o nível de rendimento de 6.000 kg ha<sup>-1</sup> de milho, seria necessário empregar 0,23 kg ha<sup>-1</sup> de N para substituir um quilograma de fósforo, de modo a manter o mesmo nível de produção, isto significa que para cada quilograma de fósforo aplicado pode-se economizar 0,23 kg de N. Para os rendimentos de 2.000, 7.000 e 8.000 kg ha<sup>-1</sup> não foram encontrados TMS correspondentes aos intervalos de doses estabelecidos que proporcionasse os respectivos níveis de produção para os fatores P e N.

De acordo com Frizzone (1998), a substituição de um fator por outro só tem vantagem econômica se a taxa marginal de substituição em valor absoluto for superior à relação inversa entre os preços dos fatores. Desta forma só seria vantajosa a substituição do N por P quando o valor absoluto da TMS for maior que 1,52. Assim, para este estudo a substituição dos fatores só é vantajosa economicamente para o nível de rendimento de 6.000 kg ha<sup>-1</sup> sem aplicação adicional de fósforo. Já Mousinho et al. (2003) avaliando lâminas de irrigação e doses de nitrogênio no rendimento econômico da melancia em Fortaleza (CE), verificaram que a substituição de um fator por outro só seria vantajosa quando o valor da TMS fosse maior que 2,96.

#### 4.9.1 Taxa marginal de substituição de N por P para número de espigas

Na Tabela 14 estão dispostos os valores da taxa marginal de substituição (TMS) do nitrogênio por fósforo. As TMS assumem valores negativos e decrescentes evidenciando que a substituição do N por fósforo é economicamente viável. À medida que se aumenta o número de espigas comerciais, as doses de N que propiciam a viabilidade econômica também aumentam, ou seja, é necessária uma dose cada vez maior para a produtividade de espigas comerciais.

**Tabela 14.** Taxa marginal de substituição de nitrogênio por fósforo ( $TMS_{N/P}$ ) e as correspondentes doses de nitrogênio e fósforo para níveis pré-determinados de espigas

P kg ha <sup>-1</sup>	3.500		8.000		12.500		17.000	
	N kg ha <sup>-1</sup>	TMS						
<b>0</b>	19,11	-12,04	47,42	-15,43	83,00	-23,89	139,55	-184,93
<b>20</b>	17,15	-10,61	45,07	-13,49	79,89	-20,39	133,21	-94,17
<b>40</b>	15,48	-9,24	43,09	-11,67	77,29	-17,32	128,30	-62,31
<b>60</b>	14,11	-7,92	41,46	-9,96	75,17	-14,57	124,51	-45,24
<b>80</b>	13,03	-6,64	40,18	-8,32	73,52	-12,04	121,64	-34,08
<b>100</b>	12,23	-5,40	39,24	-6,74	72,31	-9,69	119,58	-25,83
<b>120</b>	11,71	-4,18	38,62	-5,20	71,52	-7,44	118,27	-19,17
<b>140</b>	11,46	-2,97	38,33	-3,70	71,15	-5,27	117,66	-13,37
<b>160</b>	11,49	-1,77	38,36	-2,20	71,19	-3,14	117,73	-7,99
<b>180</b>	11,79	-0,57	38,72	-0,71	71,65	-1,02	118,48	-0,63
<b>200</b>	0,00	0,58	39,40	0,79	72,52	1,14	119,94	3,08

Pode-se observar na Tabela 14 que para o nível de produção de 17.000 espigas comerciais por hectare de milho, seria necessário o emprego de 34,08 kg ha<sup>-1</sup> de N para substituir 1 kg ha<sup>-1</sup> de fósforo, de modo a manter o mesmo nível de produção. Para os rendimentos de 21.500 e 26.000 não foram encontrados TMS correspondentes aos intervalos de doses estabelecidos.

O valor absoluto da taxa marginal de substituição neste trabalho foi de 1,52 indicando que a substituição do N por P será vantajosa economicamente para todos os rendimentos de milho, exceto para doses de 180 e 200 kg ha<sup>-1</sup> de P, tendo estes apresentado um valor absoluto da TMS inferior a 1,52.

## 5. Custo mínimo para um determinado nível de rendimento de milho

Na Tabela 15 são apresentadas as quantidades de  $P_2O_5$  e N que proporcionaram o custo mínimo para os diferentes níveis de rendimento do milho, bem como seus referidos custos relativos à aplicação de  $P_2O_5$  e N.

**Tabela 15.** Quantidade de  $P_2O_5$  e N, em  $kg\ ha^{-1}$ , que proporcionam o menor custo (CTm), em  $R\$\ ha^{-1}$ , para níveis de rendimento pré estabelecidos, em  $kg\ ha^{-1}$

Rendimento ( $kg\ ha^{-1}$ )	P ( $kg\ ha^{-1}$ )	N ( $kg\ ha^{-1}$ )	CTm ( $R\$\ ha^{-1}$ )
5.000	0	70,86	269,27
6.000	0	99,46	377,96
7.000	0	143,07	543,65
8.000	126,69	190,09	1.457,19

Observa-se que os custos mínimos são crescentes com o aumento do nível do rendimento desejado, porém para os rendimentos de 5.000, 6.000 e 7.000  $kg\ ha^{-1}$  a quantidade foi sempre zero com os custos variando de  $R\$ 269,27$ ;  $377,96$  e  $543,65$  por hectare. Já para o fator N o aumento em suas quantidades é crescente com o aumento do rendimento assim como os custos.

### 5.1 Custo mínimo para um determinado nível de número de espigas de milho

A utilização de apenas um insumo (neste caso o nitrogênio) indica um alto custo do fósforo em relação ao nitrogênio e pressupõe uma aplicação de fósforo somente a partir de 25.000 espigas por hectare. As doses de N foram crescentes com o aumento do rendimento desejado resultando em custos crescentes.

**Tabela 16.** Quantidade de  $P_2O_5$  e N, em  $kg\ ha^{-1}$ , que proporcionam o menor custo (CTm), em  $R\$\ ha^{-1}$ , para níveis de número de espigas comerciais pré estabelecidos ( $esp\ ha^{-1}$ )

Número de espigas por hectare	P ( $kg\ ha^{-1}$ )	N ( $kg\ ha^{-1}$ )	CTm ( $R\$\ ha^{-1}$ )
19.000	0	87,55	332,69
21.000	0	109,15	414,67
23.000	0	139,18	528,89
25.000	45,81	189,55	987,72

## 6. Maximização da receita líquida para rendimento

Ao considerar não haver restrição de capital para a aquisição dos fatores N e fósforo que conduziriam à máxima receita líquida, as quantidades dos fatores foram obtidas ao se igualar o produto marginal do nitrogênio com a relação entre o preço do nitrogênio e o preço do milho ( $P_N/P_M$ ), e o produto marginal do P com a relação entre o preço do fósforo e o preço do milho ( $P_P/P_M$ ), respectivamente, conforme as equações a 18 e 19.

$$\text{PMg P} = P_P/P_M = 7,9496 - 0,0468P \quad (18)$$

$$\text{PMg N} = P_N/P_M = 63,3393 - 0,3332N \quad (19)$$

Observa-se que para o mês de fevereiro de 2013, o preço do nitrogênio foi 3,80 R\$ kg<sup>-1</sup>, o do fósforo 5,80 R\$ kg<sup>-1</sup> e o do milho 1,05 R\$ kg<sup>-1</sup>, e as quantidades de N e P para obter a máxima receita líquida foram, respectivamente, 190,09 kg ha<sup>-1</sup> e 169,86 kg ha<sup>-1</sup>. Ao substituir N e P por seus respectivos valores na função de produção, a máxima receita líquida seria obtida com um rendimento de 8.043,6 kg ha<sup>-1</sup> de milho. Tendo em vista o custo de produção da cultura (R\$ 2.990,00 por hectare), os custos fixos (R\$ 719,44 por hectare), estimados pela equação 13 e os custos com N e P, que para a maximização da receita líquida seriam de R\$ 1.009,55, a máxima receita líquida obtida para este rendimento seria de R\$ 3.218,78 por hectare. Contudo a receita líquida máxima de R\$ 3.581,7 será obtida com um rendimento de 7.697,96 kg ha<sup>-1</sup> a um custo de R\$ 981,7 com a aplicação de 51,8 e 179,2 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e N, respectivamente. Considerando haver restrição de capital para a aquisição de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e N estando em disponibilidade apenas R\$ 800, a máxima receita líquida seria de R\$ 3.558,96 ha<sup>-1</sup>, onde para a obtenção desta receita seria necessário aplicar uma dose de 22,28 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e 175,51 kg ha<sup>-1</sup> de N obtendo um rendimento de 7.503,23 kg ha<sup>-1</sup> de milho verde.

### 6.1 Maximização da receita líquida para número de espigas

Considerando os preços do N, P e do milho de 3,80 R\$ kg<sup>-1</sup>, 5,80 R\$ kg<sup>-1</sup> e 0,35 R\$ kg<sup>-1</sup>, e as quantidades de N e P para a obtenção da máxima receita líquida (que foram de 147,94 kg ha<sup>-1</sup> e 189,49 kg ha<sup>-1</sup>), ao substituir P e N por seus respectivos valores na função de produção, a máxima receita líquida seria obtida com um rendimento de 25.648,3 espigas ha<sup>-1</sup> de milho. Tendo em vista o custo de produção da

cultura (R\$ 2.990,00 por hectare), os custos fixos (R\$ 719,44 por hectare), estimados pela equação 13 e os custos com N e P, que para a maximização da receita líquida seriam de R\$ 1.578,15 a máxima receita líquida obtida para este rendimento seria de R\$ 3.879,32 por hectare. A receita líquida máxima de R\$ 1.448,3 foi obtida com a aplicação de apenas 14,62 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e 51,56 de N e permitiu proporcionar um rendimento de 14.863,6 espigas comerciais ha<sup>-1</sup> com um custo de R\$ 280,76. Admitindo-se um capital disponível de apenas R\$ 200 a receita líquida seria de R\$ 1.445,5 a ser obtido com um rendimento de 14.756,9 espigas comerciais por hectare com a aplicação de 52,63 kg ha<sup>-1</sup> de N não sendo necessária adubação fosfatada.

## 7. CONCLUSÕES

- Houve efeito significativo do nitrogênio sobre o rendimento e o número de espigas comerciais de milho verde por hectare.
- O rendimento físico máximo estimado foi de 8.043,6 kg ha<sup>-1</sup> a ser obtido com as doses de 169,86 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e 190,09 kg ha<sup>-1</sup> de N.
- O número máximo de espigas comerciais de milho verde estimado foi de 25.648,3 espigas por hectare a ser obtido com a aplicação de 147,94 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e 189,49 kg ha<sup>-1</sup> de N.
- A máxima receita líquida de R\$ 3.581,7 ha<sup>-1</sup> foi obtida com um rendimento técnico estimado de 7.697,96 kg ha<sup>-1</sup> de milho verde, utilizando-se 51,8 e 179,2 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e N, respectivamente.
- A máxima receita líquida de R\$ 1.448,3 ha<sup>-1</sup> foi obtida com um nível de rendimento de 14.863,6 espigas comerciais de milho verde por hectare, utilizando-se 14,62 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e 51,56 de N.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, J. V. **A função de produção na agricultura irrigada**. 1. Ed. Fortaleza-Ceará: imprensa universitária da Universidade Federal do Ceará, 2005. v. 1000. 195p.

AMADO, T. J. C.; MIELNICZUK, J.; AITA, C. Recomendação de adubação nitrogenada para o milho no RS e SC adaptada ao uso de culturas de cobertura do solo, sob sistema plantio direto, **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, n. 1, 2002, p. 241-248. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo Viçosa.

ARAÚJO, L. A. N.; FERREIRA, M. E.; CRUZ, M. C. P. Adubação nitrogenada na cultura do milho. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 39, n. 8, p. 771-777, 2004.

BARRETO, A. C.; FERNANDES, M. F. Produtividade e absorção de P por plantas de milho em função de doses e modos de aplicação de adubo fosfatado no solo de Tabuleiro Costeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, p.148-156, 2002.

BARROS, V. da S.; COSTA, R. N. T.; AGUIAR, J. V. Função de produção do melão para níveis de água e adubação nitrogenada no Vale do Curu - CE. *Irriga*, v. 7, n. 02, p. 98 – 105, 2002.

BASI, S. Associação de *Azospirillum brasilense* e de nitrogênio em cobertura na cultura de milho. Guarapuava - PR, 2013. 50 f. (Dissertação de Mestrado em Produção Vegetal, Universidade Estadual do Centro-Oeste).

BASTOS, E. A. ; NASCIMENTO, F.N. ; ANDRADE JÚNIOR, A. S. ; CARDOSO, M. J.; RAMOS, H. M. M. Produção de milho verde sob diferentes regimes hídricos. In: **IX Congresso Latinoamericano y del Caribe e Ingeniería Agrícola e XXXIX Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola**, 2010, Vitória.

BASTOS, E. A.; ANDRADE JÚNIOR, A.S. **Boletim Agrometeorológico do ano de 2010 para o município de Teresina, PI**. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2010, 37p. (Embrapa Meio-Norte. Documentos, 181).

BLANCO F. F.; VELOSO, M. E. C.; CARDOSO, M. J. 2009. Crescimento e produção do milho verde sob lâminas de irrigação e doses de fósforo. **Horticultura Brasileira** 27: S1640-S1645.

BLANCO, F. F.; CARDOSO, M. J.; FREIRE FILHO, F. R.; VELOSO, M. E. C.; NOGUEIRA, C. C. P.; DIAS, N. S. Milho verde e feijão-caupi em consórcio sob diferentes lâminas de irrigação e doses de fósforo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**., Brasília, v. 46, n. 5, p. 524 – 530, maio de 2011.

CARDOSO, M.J.; SILVA, A.R.; ROCHA, L.P.; GUIMARÃES, L.J.M.; PARENTONI NETTO, S. Efeitos do nitrogênio na produtividade de espiga verde de milho. 2010. **Horticultura Brasileira** 28: S3786-S3789.

CARDOSO, M. J.; MELO, F. B., LEITE, L. F. C., BASTOS, E. A., SOBRINHO, C. A. Adubação nitrogenada e densidade de plantas com híbridos de milho em sistema plantio direto nas regiões sudoeste piauiense e sul maranhense, 2007. Comunicado Técnico 197.

CARDOSO, M. J.; RIBEIRO, V. Q.; MELO, F. B.; Performance de Cultivares de Milho-Verde no Município de Teresina, Piauí, 2011. Comunicado Técnico 227.

CASTRO, R. S de. **Rendimentos de espigas verdes e de grãos de cultivares de milho após a colheita da primeira espiga como mini milho.** 2007. 90 f. Tese (Doutorado em Fitotecnia Área de Concentração Agricultura Tropical) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido. Mossoró, 2007.

CIVARDI, E. A.; SILVEIRA NETO, A. N.; RAGAGNIN, V. A.; GODOY, E. G.; BROD, E. Uréia de liberação lenta aplicada superficialmente e uréia comum incorporada ao solo no rendimento do milho. Pesquisa Agropecuária Tropical, Goiânia, v. 41, n. 1, p. 52-59, 2011.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. Disponível em: [www.conab.gov.br](http://www.conab.gov.br). acesso em: 28 de outubro 2012.

COELHO, A. M. Nutrição e adubação do milho. Circular técnica 78. Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas - MG, 10 págs, dez. 2006.

DUETE, R.R.C.et al. Manejo da adubação nitrogenada e utilização do nitrogênio (15N) pelo milho em Latossolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.161-171, 2008.

EMBRAPA MILHO E SORGO, 2006. Disponível em: <http://www.cnpms.embrapa.br/> acesso em: 28 de outubro de 2012.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). Sistema brasileiro de classificação de solos. – Rio de Janeiro: EMBRAPA-SPI, 2009. xxvi, 412p.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). Manual de métodos de análise de solo / Centro Nacional de Pesquisa de Solos. – 2. Ed. rev. atual. – Rio de Janeiro, 1997. 212p. : il. (EMBRAPA-CNPS. Documentos; 1)

FAO. **Agricultural production, primary crops.** 2012. Disponível em: <http://www.fao.org> > Acesso em: 23 de maio de 2013.

FARINELLI, R.; LEMOS, L. B. Produtividade e eficiência agrônômica do milho em função da adubação nitrogenada e manejos de solo. Revista Brasileira de Milho e Sorgo, Sete Lagoas, v. 9, n. 32, p. 135-146, 2010.

FANCELLI, A.L.; DOURADO-NETO, D. Produção de milho. Guaíba: Agropecuária, 2000. 360 p.

FANCELLI, A.L. Influência do desfolhamento no desempenho de plantas e de sementes de milho (*Zea mays* L.). Piracicaba. ESALQ/USP. 172p., 1988 (Tese de Doutorado).

FORNASIERI FILHO, D. **Manual da cultura do milho**. Jaboticabal: Funep, 2007, 576p.

FRIZZONE, J. A. **Funções de resposta do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) ao uso de nitrogênio e lâmina de irrigação**. Piracicaba, 133p. Tese (Doutorado em Agronomia, área de concentração em solos e nutrição de Plantas). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. USP. 1986.

FRIZZONE, J.A. **Função de produção**. In: FARIA, M.A. (Coord.) Manejo de irrigação. Lavras: UFLA; SBEA, 1998. p.86-116.

GUIMARÃES, P. S. Desempenho de híbridos simples de milho (*Zea mays* L.) e correlação entre heterose e divergência genética entre as linhagens parentais. Campinas, 2007, 111 p. Dissertação (Mestrado em agricultura Tropical e Subtropical) – Instituto Agrônômico de Campinas.

HEXEM, R. W.; HEADY, E. O. **Water production functions for irrigated agriculture**. Ames, Iowa: The Iowa University Press, 215p. 1978.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produção Agrícola Municipal**, 2012. Disponível em: [http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/agropecuaria/estatisticas\\_previsao\\_safras/Previsao\\_safras](http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/agropecuaria/estatisticas_previsao_safras/Previsao_safras).

LEFTWICH, P. H. **O sistema de preços e a alocação de recursos**. São Paulo: Pioneira, 1976. 399p.

LUCENA, L. de F.C.; OLIVEIRA, F.A.; SILVA, I. de F.; ANDRADE, A.P. de. Respostas do milho a diferentes níveis de nitrogênio e fósforo aplicados ao solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande. v.4, n.3, p.334-337. 2000.

MAGALHÃES, P.C.; DURÃES, F.O. M; PAIVA, E. Fisiologia da planta de milho. Sete Lagoas: Embrapa, 1995. 27p. (Circular Técnica, 20)

MEIRA, F. A; BUZETTI, S.; ANDREOTTI, M.; A. R. F, O.; EUSTÁQUIO DE SÁ, M.; ANDRADE, J. A. C. Fontes e épocas de Aplicação fazer nitrogênio na Cultura do Milho irrigado **Semina**, Londrina, V.30, n.2, p.275-284, abr. / junho 2009.

MORAES, A.R.A. de **A cultura do milho verde**. 2009. Artigo em Hypertexto. Disponível em: <[http://www.infobibos.com/Artigos/2009\\_2/MilhoVerde/index.htm](http://www.infobibos.com/Artigos/2009_2/MilhoVerde/index.htm)>. Acesso em: 1/3/2013.

MOREL FREIRE, F.; VIANA, M. C. M.; MASCARENHAS, M. H. T.; PEDROSA, M. W.; COELHO, A. M.; ANDRADE, C. L. T. Produtividade econômica e componentes da produção de espigas verdes de milho em função da adubação nitrogenada. *Revista Brasileira de Milho e Sorgo*, v. 9, n. 3, p. 213-222, 2010.

MOUSINHO, F. E. P. et al. Função de resposta da melancia à aplicação de água e nitrogênio para as condições edafoclimáticas de Fortaleza, CE. **Irriga**, v. 8, n. 03, p. 264 – 272, 2003.

NASCIMENTO, F. N. do. Características agronômicas do milho verde sob diferentes regimes hídricos, PI. 2012. 82f. (Dissertação de Mestrado em Produção Vegetal, UFPI, Teresina, Piauí)

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. 1999. Fósforo em solo e planta em condições tropicais. Viçosa: UFV. 399 p.

OLIVEIRA, A. E. S.; SIMEÃO, M.; OLIVEIRA, M. J. L.; GOMES, E. R.; SINIMBU NETO, F. A.; MOUSINHO, F. E. P, Estratégias de adubação potássica na produção de milho verde buscando minimizar o uso de adubação química. IV WINOTEC – Workshop Internacional de Inovações Tecnológicas na Irrigação, 28 a 31 de Maio de 2012, Fortaleza - CE.

PAZ, V.P.S. et al. Otimização do uso da água em sistemas de irrigação por aspersão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.6, n.3, p.404-408, 2002.

PAIVA, M. R. F. C., SILVA, G. P., OLIVEIRA, F. H. T., PEREIRA, R. G., Doses de nitrogênio e de fósforo recomendadas para produção econômica de milho-verde na Chapada do Apodi - RN, **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 25, n. 4, p. 1-10, 2012.

PEREIRA FILHO, I. A. O cultivo do milho-verde. Brasília, DF, Embrapa, 2003. 204 p.

RAMBO, L.; SILVA, P. R. F., da ; STRIEDER, M. L.; SILVA, A. A. da ; SANGOI, L.; VIEIRA, V. M. Índices nutricionais de N e produtividade de milho em diferentes níveis de manejo e de adubação nitrogenada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** (1977. Impressa), v. 46, p. 390-397, 2011.

REZENDE, R.; FREITAS, P. S. L.; MANTOVANI, E. C.; FRIZZONE, J. A. **Função de produção da cultura do milho e do feijão para diferentes lâminas e uniformidade de aplicação de água**. Acta Scientiarum. Agronomy, v. 26, n. 4, p. 503-511, 2004.

RESENDE, A.V. **Fontes e modos de aplicação de fósforo para o milho em solo cultivado da região do Cerrado**. Lavras, Universidade Federal de Lavras, 2004. 169p. (Tese de Doutorado)

ROCHA, D.R. **Desempenho de cultivares de milho-verde submetidas a diferentes populações de plantas em condições de irrigação**. Jaboticabal, SP – Brasil, Tese de doutorado, 2008.

ROCHA, D.R.; FORNASIERE FILHO D.; BARBOSA J.C.; 2011. Efeitos da densidade de plantas no rendimento comercial de espigas verdes de cultivares de milho. **Horticultura Brasileira** 29: 392-397.

SEARSBROOK, C. E.; BOSS, B. D. Leaf area index and radiation as related to corn yield. **Agronomy Journal**, Madison, v.57, p. 459-471, 1973.

SECRETARIA DE PLANEJAMENTO DO ESTADO DO PIAUÍ (SEPLAN-PI). Disponível em: <http://www.seplan.pi.gov.br/>, acesso em: 28/05/2013.

SILVA, P.S.L. Consorciação milho e feijão caupi para produção de espigas verdes e grãos verdes. **Horticultura Brasileira**, v.19, p.4-10, 2001.

SILVA, P. S. L.; SILVA, P. I. B. Parcelamento da adubação nitrogenada e rendimento de espigas verdes de milho. **Horticultura Brasileira**, v. 21, n. 2, p. 149-152, 2003.

SILVA, E. C. et al. Épocas e formas de aplicação de nitrogênio no milho sob plantio direto em solo de cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 05, p. 725-733, 2005b.

THORNTHWAITE, C. W., MATHER, J. R. The Water Balance, New Jersey: Drexel Institute of Tecnology, 1955. 104p. (Publications in Climatology ).

UCCC-University of California Committee of Consultants. Guidelines for interpretation of water quality for agriculture. Davis: University of California, 13p. 1974.

VALERO, J.A.L; MAÑAS, F. J. M. S. O. Agronomia Del Riego. Madrid: Ed Mundi, 1993. 732 p.

VASCONCELLOS, C. A., PITTA, G. V. E., FRANÇA, G. E., ALVES, V. M. C., Milho e nutrição: fósforo para o milho?; **Revista Cultivar**, jan. 2000.

VASCONCELLOS, C. A.; FILHO, I. A. P. & CRUZ, J. C. Adubação para o milho verde. Circular Técnica 17. Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas-MG, 6 págs, jan. 2002.

VASQUEZ, G. H., SILVA, M. R. R. da., SOUSA, J. F. dos S., BAROLES, R. D., Fontes de *Azospirillum brasiliense* doses de nitrogênio em cobertura na cultura do milho, XXIX CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO - Águas de Lindóia - 26 a 30 de Agosto de 2012.

VELOSO, M. E. C., DUARTE, S. N., NETO, D. D., SILVA, E. C., PEREIRA, C. R. **Teor de nitrogênio, índices de área foliar e de colheita, no milho, em função da adubação nitrogenada, em solo de várzea.** Revista Brasileira de Milho e Sorgo, v.8 n.1, p. 13-25, 2009.

**Anexos****Anexo 1.** Rendimento de espigas comerciais (kg ha<sup>-1</sup>) em função das doses de fósforo e nitrogênio

Dose de P	Dose de N	R1	R2	R3	R4	Médias
0	0	448,98	1265,31	1020,41	0	911,56
	75	5918,37	4612,24	5714,28	6775,51	5755,10
	150	8204,08	4489,79	11326,53	7428,57	7862,24
	225	8653,06	7836,73	7224,49	5306,12	7255,10
	300	3836,73	2000,00	10612,24	3469,39	4979,59
80	0	1632,65	612,24	0	0	1122,45
	75	8122,45	7306,12	1795,92	2122,45	4836,73
	150	6612,24	9387,75	12204,08	5795,92	8500,00
	225	2367,35	7653,06	9795,92	6897,96	6678,57
	300	2979,59	1510,20	8938,77	8897,96	5581,63
160	0	1183,67	530,61	0	5918,37	2544,22
	75	7224,49	1387,75	8163,26	9224,49	6500,00
	150	9632,65	7959,18	9673,47	4734,69	8000,00
	225	7265,30	2163,26	10448,98	9591,83	7367,34
	300	8081,63	9224,49	1551,02	9306,12	7040,81
240	0	1510,20	2612,24	3469,39	2693,88	2571,43
	75	1673,47	5428,57	3551,02	8979,59	4908,16
	150	11530,61	9632,65	2734,69	3061,22	6739,79
	225	3836,73	10285,71	10367,34	8653,06	8285,71
	300	1224,49	11428,57	4734,69	6244,90	5908,16

**Anexo 2.** Número de espigas comerciais (esp ha<sup>-1</sup>) em função das doses de fósforo e nitrogênio

P	N	R1	R2	R3	R4	Médias
0	0	2040,82	4081,63	4081,63	0	3401,36
	75	28571,42	18367,34	20408,16	22448,97	22448,97
	150	24489,79	16326,53	30612,24	24489,79	23979,58
	225	28571,42	24489,79	24489,79	18367,34	23979,58
	300	12244,89	8163,26	30612,24	12244,89	15816,32
80	0	6122,45	2040,82	0	0	4081,63
	75	26530,60	6122,45	26530,60	32653,05	22959,18
	150	4081,63	32653,05	38775,50	20408,16	23979,58
	225	10204,08	22448,97	32653,05	22448,97	21938,77
	300	10204,08	6122,45	26530,60	32653,05	18877,55
160	0	4081,63	2040,82	0	18367,34	8163,26
	75	22448,97	6122,45	28571,42	26530,60	20918,36
	150	28571,42	22448,97	26530,60	16326,53	23469,38
	225	22448,97	8163,26	30612,24	30612,24	22959,18
	300	24489,79	28571,42	6122,45	30612,24	22448,97
240	0	1510,20	10204,08	12244,89	8163,26	8030,61
	75	6122,45	18367,34	12244,89	28571,42	16326,53
	150	28571,42	28571,42	16326,53	10204,08	20918,36
	225	14285,71	34693,87	30612,24	26530,60	26530,60
	300	4081,63	34693,87	20408,16	22448,97	20408,16

**Anexo 3.** Equações estimadas pela análise de regressão

## Rendimento

## Doses de fósforo

Doses de fósforo (kg ha <sup>-1</sup> )	Equações ajustadas	r <sup>2</sup>
0	$y = 0,215x^2 + 77,42x + 1003$	0,995
80	$y = 0,191x^2 + 71,89x + 1033$	0,933
160	$y = 0,135x^2 + 53,89x + 2790$	0,955
240	$y = 0,123x^2 + 50,40x + 2284$	0,924

## Doses de nitrogênio

Doses de nitrogênio (kg ha <sup>-1</sup> )	Equações ajustadas	r <sup>2</sup>
0	$y = 0,007x^2 + 9,723x + 781,2$	0,858
75	$y = -1,0969x + 5631,6$	0,020
150	$y = 0,074x^2 + 12,95x + 7881$	0,995
225	$y = 4,7258x + 6829,6$	0,538
300	$y = 0,067x^2 + 21,56x + 4807$	0,735

## Número de espigas

## Doses de fósforo

Doses de fosforo (kg ha <sup>-1</sup> )	Equações ajustadas	r <sup>2</sup>
0	$y = -0,7105x^2 + 248,3x + 4659,9$	0,948
80	$y = -0,596x^2 + 216,91x + 5947,5$	0,886
160	$y = -0,3758x^2 + 153,55x + 9242$	0,936
240	$y = -0,3532x^2 + 152,58x + 7477,3$	0,959

## Doses de nitrogênio

Doses de nitrogênio (kg ha <sup>-1</sup> )	Equações ajustadas	r <sup>2</sup>
0	$y = -0,0318x^2 + 30,083x + 3020,6$	0,849
75	$y = -0,1993x^2 + 22,321x + 22449$	1
150	$y = -0,0996x^2 + 11,798x + 23903$	0,981
225	$y = 10,842x + 22551$	0,323
300	$y = -0,1993x^2 + 69,515x + 15510$	0,920

**Anexo 4.** Doses de fósforo economicamente ótimas e seus respectivos rendimentos em função da relação entre o preço do fósforo ( $P_P$ ) o preço do milho ( $P_M$ )

$P_P/P_M$	Doses de fósforo ( $\text{kg ha}^{-1}$ )							
	P0		P1		P2		P3	
	Dose ótima ( $\text{kg ha}^{-1}$ )	Rendimento ( $\text{kg ha}^{-1}$ )	Dose ótima ( $\text{kg ha}^{-1}$ )	Rendimento ( $\text{kg ha}^{-1}$ )	Dose ótima ( $\text{kg ha}^{-1}$ )	Rendimento ( $\text{kg ha}^{-1}$ )	Dose ótima ( $\text{kg ha}^{-1}$ )	Rendimento ( $\text{kg ha}^{-1}$ )
7	163,77	7.915,62	169,87	7.703,49	173,67	8.077,28	176,42	7.347,33
8	161,44	7.898,18	167,25	7.683,85	169,96	8.049,50	172,36	7.316,85
9	159,12	7.878,41	164,63	7.661,60	166,26	8.018,02	168,29	7.282,29
10	156,79	7.856,32	162,02	7.636,73	162,56	7.982,84	164,23	7.243,67
11	154,47	7.831,90	159,40	7.609,25	158,85	7.943,95	160,16	7.200,99
12	152,14	7.805,16	156,78	7.579,14	155,15	7.901,36	156,10	7.154,24
13	149,81	7.776,09	154,16	7.546,42	151,44	7.855,06	152,03	7.103,43
14	147,49	7.744,69	151,54	7.511,08	147,74	7.805,06	147,97	7.048,55
15	145,16	7.710,97	148,93	7.473,12	144,04	7.751,36	143,90	6.989,61
16	142,84	7.674,93	146,31	7.432,54	140,33	7.693,95	139,84	6.926,60
17	140,51	7.636,55	143,69	7.389,35	136,63	7.632,84	135,77	6.859,53

**Anexo 5.** Doses de nitrogênio economicamente ótimas e seus respectivos rendimentos em função da relação entre o preço do nitrogênio ( $P_N$ ) e o preço do milho ( $P_M$ )

Doses de nitrogênio (kg ha <sup>-1</sup> )										
	N0		N1		N2		N3		N4	
PP/PM	Dose ótima (kg ha <sup>-1</sup> )	Rendimento (kg ha <sup>-1</sup> )	Dose ótima (kg ha <sup>-1</sup> )	Rendimento (kg ha <sup>-1</sup> )	Dose ótima (kg ha <sup>-1</sup> )	Rendimento (kg ha <sup>-1</sup> )	Dose ótima (kg ha <sup>-1</sup> )	Rendimento (kg ha <sup>-1</sup> )	Dose ótima (kg ha <sup>-1</sup> )	Rendimento (kg ha <sup>-1</sup> )
4	408,79	3.586,08	23,38	5.570,76	60,47	8.393,51	114,55	6.900,13	131,04	6.481,75
5	337,36	3.264,65	4,15	5.484,22	53,72	8.363,10	123,17	6.938,92	123,58	6.448,17
6	265,93	2.871,80	-15,08	5.378,45	46,96	8.325,94	131,79	6.986,33	116,12	6.407,13
7	194,50	2.407,51	-34,31	5.253,45	40,20	8.282,02	140,41	7.042,37	108,66	6.358,62
8	123,07	1.871,80	-53,54	5.109,22	33,45	8.231,35	149,03	7.107,02	101,19	6.302,65
9	51,64	1.264,65	-72,77	4.945,76	26,69	8.173,91	157,66	7.180,30	93,73	6.239,21
10	-19,79	5.86,08	-92,00	4.763,06	19,93	8.109,72	166,28	7.262,19	86,27	6.168,32
11	-91,21	-163,92	-111,23	4.561,14	13,18	8.038,78	174,90	7.352,71	78,81	6.089,96
12	-162,64	-985,35	-130,46	4.339,99	6,42	7.961,08	183,52	7.451,85	71,34	6.004,14
13	-234,07	-1878,20	-149,69	4.099,60	-0,34	7.876,62	192,14	7.559,61	63,88	5.910,86

**Anexo 6.** Doses de fósforo economicamente ótimas e suas respectivas quantidades de espigas em função da relação entre preço do fósforo (P<sub>P</sub>) e o preço do milho (P<sub>M</sub>)

Doses de fósforo (kg ha <sup>-1</sup> )								
PP/PM	P0		P1		P2		P3	
	Dose ótima (kg ha <sup>-1</sup> )	Nº de esp (esp ha <sup>-1</sup> )	Dose ótima (kg ha <sup>-1</sup> )	Nº de esp (esp ha <sup>-1</sup> )	Dose ótima (kg ha <sup>-1</sup> )	Nº de esp (esp ha <sup>-1</sup> )	Dose ótima (kg ha <sup>-1</sup> )	Nº de esp (esp ha <sup>-1</sup> )
7	169,93	26.350,51	176,09	25.660,34	195,33	24.917,50	206,09	23.912,73
8	169,23	26.345,23	175,25	25.654,05	194,00	24.907,50	204,67	23.902,11
9	168,52	26.339,24	174,41	25.646,92	192,67	24.896,17	203,26	23.890,07
10	167,82	26.332,55	173,57	25.638,95	191,33	24.883,50	201,84	23.876,61
11	167,11	26.325,16	172,73	25.630,14	190,00	24.869,50	200,42	23.861,74
12	166,41	26.317,06	171,90	25.620,49	188,67	24.854,17	199,01	23.845,45
13	165,70	26.308,26	171,06	25.610,01	187,33	24.837,50	197,59	23.827,74
14	165,00	26.298,75	170,22	25.598,68	186,00	24.819,50	196,18	23.808,62
15	164,30	26.288,54	169,38	25.586,52	184,67	24.800,17	194,76	23.788,08
16	163,59	26.277,62	168,54	25.573,51	183,33	24.779,50	193,34	23.766,13
17	162,89	26.266,00	167,70	25.559,67	182,00	24.757,50	191,93	23.742,76

**Anexo 7.** Doses de nitrogênio economicamente ótimas e suas respectivas quantidades de espigas em função da relação entre o preço do nitrogênio (P<sub>N</sub>) e o preço do milho (P<sub>M</sub>)

Doses de Nitrogênio (kg ha <sup>-1</sup> )										
PN/PM	N0		N1		N2		N3		N4	
	Dose ótima (kg ha <sup>-1</sup> )	Nº de esp (esp ha <sup>-1</sup> )	Dose ótima (kg ha <sup>-1</sup> )	Nº de esp (esp ha <sup>-1</sup> )	Dose ótima (kg ha <sup>-1</sup> )	Nº de esp (esp ha <sup>-1</sup> )	Dose ótima (kg ha <sup>-1</sup> )	Nº de esp (esp ha <sup>-1</sup> )	Dose ótima (kg ha <sup>-1</sup> )	Nº de esp (esp ha <sup>-1</sup> )
4	420,6	10.187,8	46,0	23.054,8	39,3	24.213,6	104,5	21.980,6	164,60	21.559,80
5	404,5	10.115,2	43,5	23.043,5	34,3	24.190,9	106,8	21.990,8	162,09	21.548,49
6	388,4	10.026,5	41,0	23.029,6	29,2	24.163,1	109,1	22.003,4	159,57	21.534,67
7	372,3	9.921,7	38,5	23.013,3	24,2	24.130,3	111,3	22.018,2	157,06	21.518,34
8	356,1	9.800,7	36,0	22.994,5	19,1	24.092,4	113,6	22.035,4	154,55	21.499,50
9	340,0	9.663,6	33,5	22.973,1	14,1	24.049,5	115,9	22.054,8	152,04	21.478,14
10	323,9	9.510,4	31,0	22.949,2	9,0	24.001,5	118,2	22.076,5	149,52	21.454,27