

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PIAUÍ**  
**CAMPUS PROFESSORA CINOBELINA ELVAS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA**  
**MESTRADO EM SOLOS E NUTRIÇÃO DE PLANTAS**

**TEORES DE MACRONUTRIENTES E PRODUTIVIDADE DO MILHO EM**  
**FUNÇÃO DE FONTES E DOSES DE ENXOFRE EM LATOSSOLO DO**  
**CERRADO**

**RICARDO DOS SANTOS LOPES**

**BOM JESUS - PI**  
**2017**

**RICARDO DOS SANTOS LOPES**

**TEORES DE MACRONUTRIENTES E PRODUTIVIDADE DO MILHO EM  
FUNÇÃO DE FONTES E DOSES DE ENXOFRE EM LATOSSOLO DO  
CERRADO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal do Piauí, Campus Professora Cinobelina Elvas, para obtenção do título de “Mestre” em Agronomia, na área de concentração em Solos e Nutrição de Plantas.

Orientador: Prof. Dr. Márcio Cleto Soares de Moura

BOM JESUS - PI

2017

FICHA CATALOGRÁFICA

Universidade Federal do Piauí

Biblioteca Setorial de Bom Jesus

Serviço de Processamento Técnico

L864t Lopes, Ricardo dos Santos.

Teores de macronutrientes e produtividade do milho em função de fontes e doses de enxofre em lotosolo do Cerrado.

/ Ricardo dos Santos Lopes. – 2017.

86 f.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Piauí, Campus Professora Cinobelina Elvas, Programa de Pós-graduação em Solos e Nutrição de Plantas, Bom Jesus-PI, 2017.

Orientação: “Prof. Dr. Márcio Cleto Soares de Moura”.

1. Zea mays. 2. Enxofre elementar. 3. Nutrição mineral. 4. Exportação de nutriente. I. Título.

CDD 635.659

RICARDO DOS SANTOS LOPES

**TEORES DE MACRONUTRIENTES E PRODUTIVIDADE DO MILHO EM  
FUNÇÃO DE FONTES E DOSES DE ENXOFRE EM LATOSSOLO DO  
CERRADO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal do Piauí, Campus Professora Cinobelina Elvas, para obtenção do título de “Mestre” em Agronomia, na área de concentração em Solos e Nutrição de Plantas.

APROVADA em 24 de fevereiro de 2017

Profº. Dr. Julian Junio de Jesus Lacerda

(CPCE/UFPI)

Profª. Drª. Daniela Vieira Chaves

(CPCE/UFPI)

Profº. Dr. Gabriel Barbosa da Silva Júnior

(CCA/UFPI)

---

Profº. Dr. Márcio Cleto Soares de Moura (CCN/UFPI)

(Orientador)

BOM JESUS - PI

2017

...Se valeu apenas? Tudo vale à pena se a alma não é pequena

Fernando Pessoa

Á Deus e a minha família, que me  
deu forças e acreditou na minha capacidade.

DEDICO

## AGRADECIMENTOS

A Deus legislador do universo, pela vida, e que me guia através das intuições no caminho do bem e faz brilhar uma luz pelo caminho que percorri e percorro.

Aos meus queridos pais, que me educaram através dos bons exemplos.

Ao meu orientador Prof. Dr. Márcio Cleto Soares de Moura, pela orientação, compreensão e todo o trabalho durante o curso e apoio imprescindível.

A Universidade Federal do Piauí e ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia pela oportunidade, conhecimento e formação em pós-graduação.

A CAPES, pela concessão de bolsas de estudos.

A Fazenda Colorado pelo fornecimento de toda estrutura da fazenda para a realização do trabalho.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas.

Aos responsáveis pelos Laboratórios de análises de solo e de Química Geral e Analítica pela cooperação e boa vontade no apoio técnico na realização das análises laboratoriais.

A Raimunda pelo apoio, compreensão, carinho e amor.

Aos colegas de pós-graduação: Liliane Oliveira Lopes, Dalliane Nogueira Lira, Antony Sampaio pela disponibilidade em ajudar sempre e ao estagiário: Marcos Paulo Teixeira.

## RESUMO GERAL

LOPES, RICARDO DOS SANTOS. **Disponibilidade de macronutrientes e rendimento da cultura de milho adubada com fontes e doses de enxofre em condições de campo.** 2017. 74p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal do Piauí, PI.

**Resumo** - As necessidades nutricionais de uma planta são determinadas pelas quantidades de nutrientes absorvidos e o conhecimento dessas quantidades permite estimar as necessidades e as taxas exportadas, bem como as formas de adubação para disponibilizar de maneira adequada cada nutriente para as culturas. Desse modo, objetiva-se determinar os teores de macronutrientes na folha e grãos de milho em função da disponibilidade dos macronutrientes da adubação com enxofre. O experimento foi conduzido na Serra do Quilombo, no município de Bom Jesus – PI. O delineamento experimental utilizado foi blocos ao acaso, com 4 repetições. Os tratamentos foram dispostos em esquema fatorial, com tratamento adicional,  $3 \times 4 + 1$ , totalizando 52 unidades experimentais. Sendo três fontes de enxofre: gesso, superfosfato simples e sulfurgran, nas doses de 0, 15, 30, 45, e 60 kg ha<sup>-1</sup> de S a lançar antes do plantio. Foram avaliados os seguintes parâmetros, teores de macronutrientes no solo nas profundidades de 0-20 e 20-40 cm, teor de N, P, K, Ca, Mg e S na folha e grão de milho, relação entre produtividade e teor de enxofre exportado. Os adubos contendo enxofre não influenciaram no valor de pH em nenhuma das fontes e doses avaliados, e não foram significativas para as profundidades. O sulfato é translocado pelo perfil do solo. O sulfurgran disponibilizou quantidade de sulfato menor em comparação com as outras duas fontes. O acúmulo total de sulfato na cultura do milho segue um padrão similar ao do N, entretanto as quantidades de enxofre acumulado são inferiores. A maior absorção de macronutrientes no grão se foi com a utilização do adubo sulfurgran. As quantidades de S-exportado apresentaram efeito significativo atingindo maiores valores entre as maiores doses, seguindo os padrões da produtividade usando o adubo gesso. O solo na profundidade 0-20 cm apresentou correlação positiva para o enxofre no grão e no enxofre exportado.

**Palavras-chave** - *Zea mays*, enxofre elementar, nutrição mineral, exportação de nutriente.

---

<sup>1</sup>Orientador: Márcio Cleto Soares de Moura – CCN/UFPI



## GENERAL ABSTRACT

LOPES, RICARDO DOS SANTOS. **Availability of macronutrients and yield of maize crop fertilized with sources and doses of sulfur under field conditions.** 2017. 98p. (1-99) Dissertation (Master in Soils and Plant Nutrition) - Federal University of Piauí, PI.

**Summary** - The nutritional requirements of a plant are determined by the amount of nutrients absorbed and the knowledge of these quantities allows to estimate the needs and rates exported, as well as the forms of fertilization to adequately provide each nutrient to the crops. In this way, the objective is to determine the macronutrient contents in the leaf and corn kernels as a function of the availability of the macronutrients of the fertilization with sulfur. The experiment was conducted in the Serra do Quilombo, Bom Jesus - PI municipality. The experimental design was a randomized complete block, with 4 replicates. The treatments were arranged in a factorial scheme, with additional treatment, 3 x 4 + 1, totaling 52 experimental units. There were three sources of sulfur: gypsum, simple superphosphate and sulfurran, at the rates of 0, 15, 30, 45, and 60 kg ha<sup>-1</sup> of S before planting. The following parameters were evaluated: macronutrients in the soil at depths of 0-20 and 20-40 cm, N, P, K, Ca, Mg and S content in corn leaf and grain, productivity and sulfur content exported. Sulfur-containing fertilizers did not influence the pH value in any of the sources and doses evaluated, and were not significant for the depths. The sulfate is translocated by the soil profile. Sulfur yielded less sulphate compared to the other two sources. The total sulfate accumulation in the corn crop follows a pattern similar to that of N, although the accumulated sulfur amounts are lower. The highest absorption of macronutrients in the grain was with the sulfuric fertilizer. The quantities of S-exported had a significant effect reaching higher values among the higher doses, following the productivity standards using the plaster fertilizer. The soil at depth 0-20 cm showed positive correlation for the sulfur in the grain and in the exported sulfur.

**Keywords:** Zea mays, elemental sulfur, mineral nutrition, nutrient export.

---

<sup>1</sup>Advisor: Márcio Cleto Soares de Moura – CCN/UFPI

## LISTA DE TABELAS

### Capítulo 2

Tabela 1. Atributos químicos do solo antes do experimento nas camadas de 0–20 e 20–40 cm .....	46
Tabela 2. Tratamentos utilizados no local do ensaio.....	47
Tabela 3. Atributos químicos do solo relacionados à disponibilidade de enxofre no solo na época do florescimento do milho em função das fontes e doses de enxofre nas profundidades de 0-20 e 20-40 cm .....	49
Tabela 4. Teores de macronutrientes nas folhas do milho na época do florescimento em função de fontes e doses de enxofre .....	54
Tabela 5. Teores de macronutrientes nos grãos do milho extraído pela cultura destinada à produção de grãos .....	57
Tabela 6. Correlação de Pearson entre a disponibilidade de enxofre no solo, teor de enxofre nas folhas e nos grãos, produtividade e quantidade de enxofre exportado pelo milho.....	61

### Capítulo 3

Tabela 1. Atributos químicos do solo antes do experimento nas camadas de 0–20 e 20–40 cm .....	13
Tabela 2. Tratamentos utilizados no local do ensaio.....	14
Tabela 3. Resumo da análise de variância para o número médio de grãos por fileiras (NGF), número médio de fileiras por espigas (NFE), peso de mil grãos (g) (PMG) e produtividade (kg ha <sup>-1</sup> ) de milho submetido a fontes e doses de enxofre .....	21

## ANEXOS

<b>Tabela 1.</b> Resumo da análise de variância para os macronutrientes avaliados na folha de milho submetido a fontes e doses de enxofre .....	85
Tabela 2. Resumo da análise de variância para os macronutrientes avaliados no grão de milho submetido a fontes e doses de enxofre .....	85

Tabela 3. Resumo da análise de variância para os macronutrientes e fatores avaliados no solo na camada de 0-20 cm submetido a fontes e doses de enxofre.....86

Tabela 3. Resumo da análise de variância para os macronutrientes e fatores avaliados no solo na camada de 20-40 cm submetido a fontes e doses de enxofre.....86

## **LISTA DE FIGURAS**

### **Capítulo 2**

Figura 1. Precipitação pluvial observada durante a condução do experimento e precipitação pluvial média nos últimos 30 anos na área. ....46

Figura 2. Produtividade e quantidade de S exportada nos grãos de milho em função de fontes e doses de S aplicadas no solo .....59

### **Capítulo 3**

Figura 1. Precipitação pluvial observada durante a condução do experimento e precipitação pluvial média nos últimos 30 anos na área .....72

Figura 2. Número de grãos por fileiras entre as doses com os fertilizantes: Sulfurgran, Superfosfato Simples e Gesso .....76

Figura 3. Médias das doses de S para o número de fileiras por espigas e peso de 1000 G em função das doses com os fertilizantes: Superfosfato Simples (SFS), Sulfurgran e Gesso .....77

Figura 4. Produtividade dos grãos de milho em função das fontes e doses de S com os fertilizantes: Superfosfato Simples (SFS), Sulfurgran e Gesso.....79

## SUMÁRIO

Resumo Geral .....	i
General Abstract .....	ii
Lista de tabelas .....	iii
Lista de figuras .....	iv
<b>CAPÍTULO 1:</b> .....	1
1. INTRODUÇÃO GERAL .....	1
2. REFERENCIAL TEÓRICO .....	3
2.1 Dinâmica do enxofre .....	3
2.2 Enxofre no ar e na água .....	4
2.3 Enxofre no solo.....	5
2.4 Teores de sulfato no solo em profundidade.....	7
2.5 A importância do enxofre para a planta.....	8
2.6 Resposta das culturas a adubação sulfurada .....	8
2.7 Usos de fertilizantes contendo enxofre.....	10
2.8 Uso e oxidação de enxofre elementar em solos brasileiros .....	11
2.9 Respostas das culturas ao uso de fertilizantes com enxofre .....	13
2.10 Nutrição de plantas com enxofre .....	14
2.11 Absorção e translocação de enxofre nas culturas .....	15
2.12 Absorção de nutrientes e acúmulo de matéria seca em milho.....	16
2.13 Acúmulo de nutrientes na folha e grãos de milho .....	17
2.14 Avaliação da disponibilidade de S para as plantas .....	18
2.15 Incorporação do nutriente pela planta de milho .....	20
3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	21
<b>CAPÍTULO 2: DISPONIBILIDADE NO SOLO E TEOR DE MACRONUTRIENTES EM FOLHAS, GRÃOS E PRODUTIVIDADE DE MILHO SOB FERTILIZAÇÃO COM ENXOFRE.....</b>	<b>30</b>
Resumo .....	30
Abstract.....	31
1. INTRODUÇÃO.....	32
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	33
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	36
4. CONCLUSÕES .....	50
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	50

<b>CAPÍTULO 3: RESPOSTA AS FONTES E DOSES DE ENXOFRE NO DESENVOLVIMENTO DA CULTURA DO MILHO SOB ESTRESSE HÍDRICO EM SOLO TROPICAL</b> .....	56
Resumo .....	56
Abstract.....	57
1. INTRODUÇÃO.....	58
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	60
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	62
4. CONCLUSÕES .....	68
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	69
ANEXOS .....	73

# CAPÍTULO 1

## 1. INTRODUÇÃO GERAL

O enxofre (S) está presente em todos os ambientes do planeta seu ciclo compreende processos que ocorrem nas rochas, no solo, na atmosfera, na água e nos seres vivos. O S é um elemento essencial para todas as formas de vida, sendo um constituinte comum das proteínas e de muitos outros compostos celulares. No solo o S encontra-se nas formas orgânicas e inorgânicas, sendo a primeira a mais abundante encontrada na maioria dos solos. O S inorgânico no solo predomina como sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) na solução ou adsorvido nos grupos funcionais dos colóides (Osório Filho, 2006).

O sulfato enfrenta no solo três fatores que dificultam a sua permanência. O primeiro é a presença de teores maiores de matéria orgânica, que reduz a adsorção por óxidos e aumenta a carga negativa do solo, portanto, repelindo sulfatos. O segundo é a aplicação frequente de calcário, causando o aumento do pH e a liberação de sulfatos adsorvidos. Finalmente, os fosfatos aplicados em adubações ocupam preferencialmente as posições de troca que seriam ocupados por sulfatos. Este fato é evidenciado na maior dose de P aplicada, em que houve resposta da adição do S-elementar, ocorrendo maior disponibilidade de S no solo (Raij 1991).

Deficiências de enxofre ocorrem em diversas regiões do Brasil, notadamente nas áreas de Cerrado. As fontes mais utilizadas para suprir o S às plantas são o superfosfato simples, que contém 12% de S-sulfato e o sulfato de amônio, com 24% de S-sulfato sendo ambos utilizados isoladamente ou como componentes de fertilizantes comerciais. A utilização de S-elementar, que contém mais de 90% de S, incorporado a fertilizantes comerciais é uma alternativa que pode aumentar a concentração dos nutrientes nas formulações e reduzir os custos de produção, de transporte e de aplicação do fertilizante (Horowitz & Meurer, 2006).

A disponibilidade de um nutriente depende da inter-relação entre a quantidade que mede a reserva lábil do nutriente na fase sólida do solo para as culturas, intensidade, que mede o nutriente na solução, e a capacidade de reposição do nutriente da reserva lábil para a solução (capacidade tampão, CT) (Paiva & Nicodemo, 1994).

A absorção de enxofre e o crescimento das plantas podem ser correlacionados em solos com diferentes teores de enxofre extraível. Em solos com baixa capacidade de adsorção de sulfato os teores de enxofre presentes devem ser superiores aos solos com alta capacidade de adsorção, para que o crescimento e a produção das plantas sejam

semelhantes. Portanto, a determinação destes dois aspectos juntamente concorre para uma avaliação mais acurada da disponibilidade de S (Barrow, 1969).

Solos com boa disponibilidade de fósforo estão recebendo, nos últimos anos, adições de fertilizantes com baixas concentrações, onde o fósforo é suprido como superfosfato simples, que contém apreciáveis quantidades  $S-SO_4^{2-}$  (12%). Assim, há necessidade de se avaliar a disponibilidade de  $S-SO_4^{2-}$  nos solos das diferentes regiões agroecológicas e realizar alguns ensaios de fertilização com  $S-SO_4^{2-}$ , na tentativa de melhorar a definição do teor crítico e avaliar a resposta das plantas (Alvarez, 2004).

Apesar de as gramíneas estarem classificadas como culturas que necessitam de baixas quantidades de S, existem casos em que elas responderam às adições desse nutriente, como em situações com grande produção de massa seca e, conseqüentemente, elevada demanda por S (Osório Filho et al. 2007).

Atualmente, mesmo com a adoção do sistema de plantio direto, os incrementos nos teores de matéria orgânica são lentos em decorrência da baixa quantidade de resíduos produzidos anualmente, quer por causa da manutenção de pousio invernal, quer pelo monocultivo de soja no verão, ou até pela combinação das duas situações (Rheinheimer et al. 2007).

Com isso as gramíneas podem responder a aplicação de S, apesar de serem classificadas como plantas que requerem baixa quantidade desse nutriente para o seu desenvolvimento. A resposta ocorre principalmente em espécies com alta produção de matéria seca, em áreas com alta disponibilidade de fósforo e nitrogênio acompanhada de baixa disponibilidade de S, respondendo a aplicação de 20 a 40 kg ha<sup>-1</sup> de  $S-SO_4^{2-}$  (McClung & Quinn, 1959; Casagrande et al. 1982; Faquin et al. 1995).

O enxofre é um dos nutrientes de plantas que vem recebendo pouca atenção em estudos de fertilidade do solo, ficando relegado a poucas pesquisas no mundo. Os estudos enfocando o elemento têm indicado deficiência de enxofre nas culturas, em áreas com agricultura intensiva. O enxofre é um dos macronutrientes de menor expressão nos estudos de fertilidade do solo, provavelmente, devido a não valorização do nutriente nas fórmulas utilizadas em manejos de adubação (Teixeira, 2004).

Em condições de elevada concentração de enxofre na solução do solo, devido à fertilidade natural ou à aplicação de fertilizantes, o fluxo de massa promoveria o suprimento do nutriente em quantidades suficientes para as plantas. Por outro lado, em solos mais intemperizados, com baixa concentração de nutrientes na solução do solo, o fluxo de massa poderia ser insuficiente para satisfazer a demanda (Silva et al. 1998).

Em diversos países, fertilizantes contendo S-elementar vem sendo utilizados de forma crescente como Canadá, Austrália, Nova Zelândia. Estes incluem o S-elementar sob várias formas, puro (com pó), incorporado aos fertilizantes granulados, granulados com agentes dispersantes e em suspensões aquosas para aplicação em sistemas de irrigação (Zhao et al. 1996).

Recentemente o S-elementar tem despertado interesse no Brasil, se destaca dos sais de sulfato por ter baixa solubilidade e por conter alta concentração de S (90%), comparada com 12% de superfosfato simples e 24% de sulfato de amônio (Cantarella et al. 2007).

A utilização de S-elementar incorporado a fertilizantes comerciais é uma alternativa que pode aumentar a concentração dos nutrientes nas formulações e reduzir os custos de produção, de transporte e de aplicação do fertilizante (Horowitz & Meurer 2006). O uso de enxofre (S) elementar como fertilizante, isoladamente ou associado às fórmulas NPK, pode reduzir os custos de adubação em solos deficientes em enxofre (Horowitz, 2003).

## **2. REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 Dinâmica do enxofre**

A entrada de S no solo pode ocorrer pelo intemperismo de minerais sulfatados, pelas águas da chuva e irrigação, pela adsorção direta do S atmosférico e pelas adições de fertilizantes minerais e orgânicos. Por outro lado, as saídas deste elemento estão relacionadas às exportações pelas culturas, a lixiviação, a erosão e a emissão de gases sulfurados (Osório Filho, 2006).

A lixiviação é tida como a principal forma de saída de  $\text{SO}_4^{2-}$  do sistema solo. Estudos com a utilização de lisímetros feitas por Lyon e Bizzel (1918 apud Jordam & Ensminger, 1958), mostraram que a remoção de  $\text{SO}_4^{2-}$  pela água de drenagem foi três a seis vezes superiores daquele exportado pelas colheitas.

Cálculos realizados por Osterholm & Astrom (2004) para solos finlandeses reforçam a importância da lixiviação no processo de perdas de  $\text{SO}_4^{2-}$  do solo, as perdas por emissão de gases ou exportação pelas culturas são insignificantes quando comparadas com as perdas por lixiviação, que sob condições locais, são da ordem de  $633 \text{ kg de SO}_4^{2-} \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ . Estudos do balanço de S no solo realizado por Eriksen et al. (2002) mostraram que a saída de  $\text{SO}_4^{2-}$  do perfil do solo via lixiviação reduziu o teor de S no tecido das culturas.



Osório Filho (2006) afirma que há pouco conhecimento sobre a contribuição da chuva e da irrigação no fornecimento de S ao solo e sobre a concentração de S na solução do solo ao longo dos ciclos de cultivo. A incorporação ao solo nas formas gasosas, pela deposição atmosférica ou pela dissolução na água da chuva, é variável entre regiões e apresenta maior importância nas proximidades de áreas urbanas e industriais (Alvarez et al. 2007).

## **2.2 Enxofre no ar e na água**

A contribuição da água da chuva no suprimento de S às plantas foi relatada por diversos autores (Osório Filho et al. 2007). A chuva pode ser uma importante fonte de suprimento de enxofre. Em solos argilosos, o enxofre trazido pela água da chuva pode ficar retido nos colóides aumentando a disponibilidade do elemento às plantas. Em solos arenosos, a precipitação atua como dreno de enxofre, pois, carrega o enxofre da chuva e parte do enxofre do solo para subsuperfície, podendo este ficar inacessível às culturas.

A maior densidade demográfica de uma região provavelmente tenha como consequência uma maior contaminação ambiental, aumentando a liberação de enxofre ao ambiente através da queima de combustíveis fósseis, queima de madeiras e emissão de resíduos de fábricas. Estes fatores permitem que se tenha maior concentração de enxofre no ambiente e, conseqüentemente, maior aporte de sulfato por meio das precipitações (Alvarez, 2004).

Na região metropolitana e rural de Porto Alegre, a contribuição de enxofre pela água da chuva foi de 39,4 e 99,2 kg por hectare por ano, para áreas rurais e urbano-industriais, respectivamente (Guedes, 1985). Outros estudos no país reforçam a teoria do grande fornecimento de enxofre com a chuva como no Vale do Quilombo, Cubatão e Santos, onde o aporte foi de 75,4; 86,3 e 43,5 kg de S por ha<sup>-1</sup>ano<sup>-1</sup>, respectivamente (Moreira - Nodermann, 1986; Danelon et al. 1991).

Estudos na China mostram que as contribuições de sulfato na água da chuva podem variar de 16,5 a 397 kg de S ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> dependendo da região de coleta (Chen, 1993; Wang et al. 2004).

Na revisão de Jordan & Ensminger (1958), já havia constatação de que consideráveis quantidades anuais de S podem ser depositadas nos solos através das precipitações, podendo, contudo, variar em função do local e da época do ano. Always et al. (1937), observaram contribuição na ordem de 112 kg de S ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> em Mineapolis – EUA, mas valores inferiores a 6 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> nas regiões menos industrializadas do mesmo país.

Atualmente é frequente o cultivo em áreas com baixos teores de MOS e/ou obtenção de altas produtividades com altas extrações desse nutriente, aumentando a probabilidade de o solo apresentar limitações no fornecimento de enxofre às plantas cultivadas, especialmente em cultivos contínuos (Osório Filho et al. 2007).

Como se observa, a contribuição pela água da chuva pode alcançar valores consideráveis, inclusive podendo suprir as necessidades das culturas, ou mesmo acumular-se no solo. Também, a entrada de enxofre atmosférico e a deposição dos resíduos superficiais devem ter contribuído para a manutenção dos teores superficiais (Rheinheimer et al. 2005).

### **2.3 Enxofres no solo**

O S predomina no solo na fração orgânica, com mais de 90% do total. Além da matéria orgânica do solo (MOS) influenciar na sua dinâmica e disponibilidade às plantas, a disponibilidade de S é afetada pelos teores de P, onde competem por sítios de adsorção nos colóides minerais, assim como diretamente relacionado com a aplicação de N no solo residual (Alvarez et al. 2007).

Eriksen & Askegaard (2000) alertam para o fato de que as perdas de sulfato por percolação podem tornar negativo o balanço entre entradas e saídas de enxofre no solo, independentemente do tipo de rotação de culturas adotado. Se for considerado que as deposições atmosféricas desse nutriente tendem a diminuir no futuro, haverá necessidade de reposição de fertilizantes sulfatados, para no mínimo, tornar o balanço nulo.

O processo de adsorção de sulfato constitui-se num rápido equilíbrio entre a fase sólida e a solução do solo, sendo considerado um importante fator controlador da disponibilidade de enxofre (Barrow, 1969). Os principais fatores que influenciam a adsorção de sulfato são: pH do solo, o tipo e teor de minerais, a competição com outros ânions pelos sítios de adsorção, o tipo de cátion na solução e no complexo de troca do solo. A adsorção é também dependente da concentração de sulfato na solução (Costa, 1980).

O pH do solo tem efeito marcante sobre a adsorção de sulfato. O aumento do pH do solo pela calagem diminui a adsorção de sulfato e maiores quantidades desse ânion passam para a solução do solo. Elkins e Ensminger (1971) os ânions sulfato na solução ficam sujeitos a perdas no solo por lixiviação. Este efeito depende, entre outros fatores, da magnitude da concentração de sulfato na solução (Paiva e Nicodemo, 1994).

A magnitude da lixiviação de  $S-SO_4^{2-}$  em dado solo depende diretamente do volume de água que se movimenta verticalmente pelo perfil. Em regiões de intensa precipitação pluvial constataram-se menores teores de S disponível no solo, devido às perdas por lixiviação (Barrow, 1969).

No entanto, a disponibilidade imediata do S é controlada pelo processo de adsorção/dessorção do sulfato, por meio do equilíbrio rápido entre aquele que está na solução e aquele da fase sólida do solo (Tiecher et al. 2012). A adsorção do sulfato depende principalmente dos teores e dos tipos de argilominerais e de óxidos presentes no solo. Os grupos funcionais das arestas quebradas da caulinita e da superfície dos óxidos de ferro são os que possuem maior capacidade de reter esse íon (Ensminger, 1954; Peak et al. 1999; Tiecher et al. 2012).

As transformações de S no solo são controladas por processos bióticos e abióticos. As transformações bióticas estão relacionadas aos processos de mineralização, imobilização, oxi-redução e assimilação de S pela planta. Enquanto que os processos abióticos ocorrem em forma de adsorção, dessorção, precipitação e dissolução de S inorgânico (Norman et al. 2002).

A população microbiana ao decompor compostos orgânicos com baixa relação C/S disponibiliza o  $SO_4^{2-}$  por mineralização para a solução do solo. Entretanto em materiais orgânicos com baixa relação C/S os decompositores necessitam de uma quantidade maior de S para incorporar em sua biomassa. Dessa forma, o S inorgânico do solo é imobilizado, tornando-se temporariamente indisponível às plantas, semelhantemente ao que ocorre com o N. Em solos mal drenados, com baixa difusão de oxigênio, as formas reduzidas de S são as que predominam, tais como dióxidos de S ( $SO_2$ ), sulfito ( $SO_3^{2-}$ ), tiosulfato ( $S_2O_3^{2-}$ ), S elementar ( $S^0$ ) e sulfeto ( $S^{2-}$ ) (Stipp & Casarin, 2010).

Os Latossolos têm maior capacidade de adsorver o  $S-SO_4^{2-}$  presente na solução do solo. A adsorção do sulfato é maior quanto maior o número de grupos funcionais de superfície no solo (Elmingsger, 1954; Chao et al. 1962; Barrow, 1967; Parfitt e Smart. 1978; Alvarez, 2004). O pH do solo é fundamental na capacidade de retenção de sulfato, pois, ao aumentar o pH do solo ocorre a desprotonação dos grupos funcionais de superfície. Com a geração de grupos desprotonados há uma diminuição de sítios onde o sulfato pode ficar adsorvido, pois ocorre à repulsão entre estes grupos e o sulfato, conseqüentemente, há um aumento de  $S-SO_4^{2-}$  na solução do solo.

Há necessidade de mensuração das entradas e saídas desse nutriente no solo para que o balanço do enxofre no solo possa ser corretamente quantificado (Rheinheimer et al. 2005).

#### **2.4 Teores de sulfato no solo em profundidade**

A quantidade total de enxofre quanto à capacidade de adsorção do  $\text{SO}_4^{2-}$  são menores em solos com baixos teores de argila e sua retenção é ainda diminuída pela aplicação de calcário e de fosfato. Assim, há um deslocamento desse íon às camadas mais profundas, onde pode ser adsorvido por causa dos maiores teores de argila e menores teores de matéria orgânica e valores de pH (Rheinheimer et al. 2005).

O aumento de pH diminuiu a adsorção do  $\text{S-SO}_4^{2-}$  aos grupos funcionais (Harward & Reisenauer, 1966; Elkins & Ensminger, 1971; Couto et al. 1979; Costa, 1980; Korentajer et al. 1983) deslocando-o à solução do solo, e conseqüentemente, favorecendo o seu deslocamento para as camadas inferiores. Se nestas camadas o pH for mais baixo, o que é comum, e adicionalmente, tiver altos teores argila, há aumento da retenção de  $\text{S-SO}_4^{2-}$  (Chao et al. 1962).

Outro fator influenciado pela calagem é a população microbiana do solo, responsável pela mineralização da matéria orgânica, disponibilizando o enxofre que se encontra na forma orgânica (Korentatajer et al. 1983). Em conseqüência disso, poderá favorecer a lixiviação do enxofre para as camadas mais profundas (Ensminger, 1954).

A adsorção e a dessorção de  $\text{SO}_4^{2-}$  nos grupos funcionais dos colóides inorgânicos são dependente do pH do solo (Chao et al. 1962). Uma vez que, quando esses estão protonados, o processo de troca de ligante é favorecido pelo enfraquecimento da ligação do oxigênio ao metal. A energia de ligação do  $\text{SO}_4^{2-}$  aos grupos funcionais é fraca comparativamente àquela do fosfato, sendo que é facilmente deslocado por outros ânions (Rheinheimer et al. 2005).

Embora existam grandes perdas de  $\text{S-SO}_4^{2-}$ , em alguns casos quando aplicado altas doses de  $\text{S-SO}_4^{2-}$  principalmente na forma de gesso, a movimentação no perfil do solo pode ajudar a movimentação de cátions chamados de acompanhantes. Em solos com baixa CTC e altos teores de  $\text{Al}^{3+}$  pode ajudar a diminuir a toxidez deste último, permitindo o melhor desenvolvimento das raízes, promovendo maior exploração do solo e facilitando a absorção de água, muito importante em períodos de estiagens (Ritchey et al. 1980; Quaggio et al. 1982; Pavan et al. 1984).

A dinâmica da disponibilidade de  $\text{S-SO}_4^{2-}$  em solos bem manejados, sem impedimentos físicos, químicos e biológicos, pequenas doses de enxofre aplicadas já

são suficientes para abastecer as necessidades das culturas, considerando que parte do S também pode ser absorvido do subsolo (Quaggio et al. 1993) ou ainda, por mineralização dos resíduos orgânicos depositados na superfície do solo. Quando os solos não são bem manejados apresentando pouco teor de matéria orgânica, camadas compactadas em subsuperfície e toxidez de alumínio na sub-superfície, os quais restringem o aprofundamento do sistema radicular, podendo existir alta probabilidade de resposta à fertilização sulfatada (Chao, 1963; Elkins, 1971; Korentajer et al. 1983; Alvarez, 2004).

É importante levar em consideração a análise de solo e dirigir o programa de adubação a fim de manter o solo nas classes de teores médio ou alto. Um solo muito pobre geralmente apresenta limitações nos patamares de produção, mesmo quando as doses aplicadas são elevadas. Por outro lado, quando o solo atinge classes de teores altos ou muito altos, a aplicação de grandes quantidades do nutriente não trás retornos econômicos, além de representar um desperdício de recursos, muitas vezes, contribuir para o aumento da poluição do meio (Duarte & Cantarella, 2008).

## **2.5 A importância do enxofre para as plantas**

Pesquisas com enxofre tiveram início no Brasil na década de 50, pois até então não era dada a devida importância ao elemento em função dos solos apresentarem teores consideráveis. Entretanto, com o cultivo intensivo os estoques foram decrescendo e, atualmente, diversos trabalhos indicam a eficiência da aplicação de S para a cultura do milho, tanto nos solos do Brasil como em outros países (Yamada et al. 2007; Rehm, 2005).

O enxofre, assim como outros nutrientes, apresenta significativa importância no desenvolvimento das plantas, por fazer parte da constituição protéica, síntese de clorofila, formação de ferredoxina, entre outros constituintes (Alvarez et al. 2007).

O S possui ainda papel de defesa nas plantas contra pragas e doenças, devido a grande variedade de compostos secundários que contém N e S em sua estrutura e embora o uso de S<sup>0</sup> como fungicida seja antigo, recentemente foi demonstrado que a planta pode gerar S<sup>0</sup> endógeno, como mecanismo de defesa contra o patógeno (Stipp & Casarin, 2010).

## **2.6 Respostas das culturas a adubação sulfurada**

O teor de enxofre no solo na forma de sulfato tem sido usado para prever respostas ao elemento. Em solos com teores de enxofre inferiores a 10 ppm (mg/dm<sup>3</sup>) (extração com fosfato de cálcio), o milho apresenta grande probabilidade de resposta a

esse nutriente. Nesse caso, recomenda-se a aplicação de 30 kg ha<sup>-1</sup> de S (Coelho et al. 2008).

De acordo com os resultados obtidos pelos diferentes trabalhos, não existe uma condição específica que determine a resposta das culturas à adição de S, mas há circunstâncias em que solos podem apresentar menor disponibilidade e exibir resultados favoráveis a adubação. Por outro lado, parece haver dificuldades de se estabelecer um teor crítico no solo pelos métodos de análise usados, quer seja pela ineficiência do próprio método ou porque outros fatores podem mascarar a ocorrência de respostas. Estas podem estar associados à ocorrência de formas de S não acessadas pelo método de extração, taxas de dessorção compatíveis com a necessidade da planta, à absorção de camadas mais profundas, taxas de mineralização dos resíduos vegetais e mesmo da MOS (Matéria Orgânica do Solo), e entrada de sulfato dissolvido na água da chuva ou de irrigação (Osório Filho et al. 2007).

Quando não há resposta no rendimento de uma cultura, significa que nenhum tratamento está limitando a absorção de S pelas plantas, em quantidades adequadas. Essa quantidade suficiente de S, em tratamentos sem fertilização com o nutriente, pode ser explicada de várias formas, entre elas, o elevado teor inicial de S, a ocorrência de formas de S não acessadas pelo método de extração, a constante mineralização da matéria orgânica, a entrada de S com a chuva ou a irrigação, ou mesmo, a absorção direta de S atmosférico pelos estômatos da planta. Além disso, processos que permitem a movimentação do SO<sub>4</sub><sup>-2</sup> de camadas mais profundas para regiões próximas à superfície do solo também podem mascarar as respostas das culturas. Tais processos seriam o fluxo ascendente de SO<sub>4</sub><sup>-2</sup> em períodos de balanço hídrico negativo e a ciclagem deste elemento por plantas de cobertura de elevado crescimento radicular (Osório Filho, 2006).

A probabilidade de resposta à aplicação de S é maior em solos intemperizados, com grande quantidade de óxidos de ferro, baixo conteúdo de matéria orgânica e baixos teores de argila (Mielniczuk et al. 2000; Alvarez, 2004).

Em um Argissolo Vermelho distrófico arênico, em experimento com milho (*Zea mays* L.) irrigado, produzindo cerca de 10 toneladas de grãos, constataram resposta ao S ao cultivarem milho na safra seguinte, quando ocorreu deficiência hídrica, alcançaram cerca da metade da produtividade da safra anterior, não obtendo resposta à adubação sulfatada (Rheinheimer et al. 2005).

Para as outras gramíneas, também persistem as contradições nas respostas à adição de fertilizantes sulfatados e nem sempre estão relacionadas aos teores de sulfato numa determinada camada de solo, pois muitos fatores podem afetar a mineralização do enxofre orgânico, a distribuição do sistema radicular no perfil do solo e até a deposição atmosférica desse nutriente (Osório Filho et al. 2007).

De uma maneira geral, existem poucos estudos sobre a resposta das plantas ao S, o cultivo intensivo de solos com baixo teor de matéria orgânica e de argila, o uso de fertilizantes concentrados e a contínua exportação de S sem reposição podem levar à diminuição da disponibilidade de S às plantas, possibilitando a deficiência de S e a diminuição de rendimento das culturas (Osório Filho, 2006).

## **2.7 Usos de fertilizantes contendo enxofre**

Deficiências de enxofre ocorrem em diversas regiões do Brasil, notadamente nas áreas dos Cerrados. As fontes mais utilizadas para suprir o S às plantas são os superfosfatos simples, que contem 12% de S-sulfato, e o sulfato de amônio, com 24% de S-sulfato, ambos são utilizados isoladamente ou como componentes de fertilizantes comerciais. (Horowitz & Meurer, 2006).

O gesso agrícola, um subproduto da indústria de ácido fosfórico que contem principalmente sulfato de cálcio e pequenas concentrações de P e F, é largamente disponível em muitas partes do mundo, somente no Brasil, cerca de 4,5 milhões de toneladas são produzidas anualmente (Vitti, 2000).

Um dos componentes mais importantes para esse desenvolvimento da agricultura, principalmente no que diz respeito ao aumento da produtividade agrícola, sem esquecer os outros fatores de produção. Foi a pesquisa em fertilidade do solo e as inovações científicas e tecnológicas que permitiram o uso eficiente de corretivos e de fertilizantes na agricultura brasileira. Segundo dados da FAO, cada tonelada de fertilizante mineral aplicado em um hectare, de acordo com princípios que permitam sua máxima eficiência, equivale à produção de quatro novos sem adubação. É, portanto, indissociável a estreita inter-relação entre fertilidade do solo e produtividade agrícola. (Lopes & Guilherme, 2007)

O enxofre é geralmente aplicado como fertilizante em culturas comerciais na forma de sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ). Entretanto, pesquisas demonstraram que a forma elementar do ( $\text{S}^0$ ) pode ser considerado fertilizante, desde que as condições do solo, fonte e cultura na qual o elemento for aplicado, permitam a conversão da forma elementar para o sulfato.

Existe a possibilidade de em alguns solos, o SO se tornar mais eficiente que o  $\text{SO}_4^{2-}$  em função do efeito residual (Alvarez et al. 2007).

A aplicação do gesso agrícola é a forma mais barata e eficiente para se elevar os teores de sulfato no solo, pois as doses recomendadas são bem mais elevadas comparativamente a aplicação de fertilizantes (Rheinheimer et al. 2005).

Para solos do Cerrado a quantidade de gesso agrícola a ser aplicado para culturas anuais é de 50 vezes o teor de argila. O gesso é um sal neutro e, como tal, não afeta diretamente a reação do solo em termos de pH. Tem como função diminuir a saturação por Al e aumentar os teores de Ca e S em profundidade (Souza, 2004).

A solubilidade do gesso, que é dependente da sua granulometria, é um fator de suma importância quando empregado como fonte de Ca e de S para as plantas. Mesmo sendo considerada uma fonte alternativa de S para as culturas, a aplicação de gesso, entretanto, deve ser feita com cautela, sempre associada com doses elevadas de calcário, para não provocar desequilíbrio de bases na camada arável, por perdas de Mg e K (Quaggio et al. 1982).

Vale destacar, que o gesso agrícola apresenta efeito residual no solo, sobretudo em solos argilosos (Caires et al. 2011) influenciado pela variação climática tanto regional quanto temporal, dose aplicada, período entre a aplicação e a análise do solo (Pauletti et al. 2014).

No Brasil, em áreas de Cerrado, é necessária a aplicação de grandes quantidades de fertilizantes fosfatados, que, nem sempre, são aplicados simultaneamente com fontes de enxofre, devido ao uso de fórmulas concentradas de fertilizantes, tornando mais frequentes os problemas de deficiência de enxofre (Hitsuda et al. 2005) e colocando em risco a obtenção de altos rendimentos.

Além disto, em solo que recebe calcário, o enxofre pode ser lixiviado, devido ao aumento de cargas negativas, que geralmente se acumulam nas camadas de subsolo. Há grande variação nas doses de calcário recomendadas pelos métodos de cálculo da necessidade de calagem para uma mesma região, clima, solo e cultivar utilizada e a influência da calagem na dinâmica do enxofre no solo deve ser avaliada visando a evitar possíveis deficiências deste nutriente na cultura do milho. (Melo et al. 2011).

## **2.8 Uso e oxidação do enxofre elementar em solos brasileiros**

A incorporação do S-elementar a fertilizantes convencionais como uréia e superfosfato triplo, é outra forma de acúmulo do teor do nutriente em formulações de NPK. Para adubos fosfatados, principalmente, o superfosfato triplo é viável adicionar o



S-elementar através de diferentes tipos de processos industriais. Porém, a forma de incorporação do S-elementar ao superfosfato triplo terá repercussões na eficiência do fertilizante. (Stipp & Casarin, 2010).

A oxidação pode ser realizada por fatores abióticos; porém, as reações catalisadas pelos microrganismos são os principais agentes nesse processo. Fatores de solo como pH, textura, disponibilidade de nutrientes, aeração e temperatura podem afetar a oxidação do S-elementar a S-sulfato (Germida & Janzen, 1993).

O efeito do pH na oxidação do S-elementar possivelmente está relacionado à capacidade do solo em tamponar o ácido sulfúrico formado na oxidação, que, se acumulado em altas concentrações, inibe a atividade dos microrganismos que transformam S-elementar em S-sulfato (Fox et al. 1964; Barrow, 1971).

O superfosfato triplo ao qual foi incorporado S-elementar na forma de pó apresentou eficiência agrônômica crescente com o decorrer dos cultivos, atingindo índices de eficiência agrônômica (IEA) superiores ao do gesso em pó e ao superfosfato simples (fonte de S padrão) no terceiro e no quarto cultivo. O superfosfato triplo revestido com S-elementar fundido apresentou índices intermediários. Estes resultados indicam que a utilização do S-elementar associado a fontes de fósforo granulados apresentam potencial de utilização em áreas com níveis adequados do nutriente, porém necessitam de reposição de enxofre. Os autores de trabalhos com enxofre julgam que os solos de muitas regiões do território brasileiro apresentam condições favoráveis para a oxidação do S-elementar a S-sulfato (Stipp & Casarin, 2010).

Acredita-se igualmente, que existem excelente perspectivas, embora novas pesquisas sobre o tema sejam necessárias, para a fabricação de fertilizantes granulados que contenham S-elementar, possibilitando a obtenção de fórmulas com altas concentrações em NPK e em enxofre, o que resulta numa significativa redução de custos ao produtor (Stipp & Casarin, 2010).

Boaro et al. (2014) Um corretivo muito utilizado para diminuir o pH de solos minerais em regiões com problemas de alcalinidade é o enxofre elementar (S<sup>0</sup>). Seu efeito acidificante está associado à oxidação deste por microorganismos, com conseqüente formação de ácido sulfúrico e posterior liberação de íons de hidrogênio na solução (Heydarnezhad et al. 2012).

Os microrganismos envolvidos no processo de oxidação são, principalmente, bactérias de gênero *Thiobacillus* (Heydarnezhad et al. 2012). Além dos microrganismos,

fatores físicos de substratos influenciam na taxa de oxidação de S, como a umidade, aeração, temperatura e teor de matéria orgânica (Orman & Kaplan, 2011).

A oxidação do S elementar ocorre em temperaturas entre 4 e 45°C com uma faixa ótima entre 25 e 40°C, quanto à umidade, baixos teores de água limitam a atividade microbiana e reduzem a acessibilidade às partículas de S, que são altamente hidrofóbicas. Porém, teores elevados de umidade reduzem significativamente a oxidação, como consequência da baixa aeração do substrato. Já com relação a matéria orgânica, maiores teores favorecem a oxidação, o que está associado à utilização desta como fonte de energia e carbono pelos microrganismos (Sierra et al. 2007).

## **2.9 Resposta das culturas ao uso de fertilizantes com enxofre**

A obtenção de altos rendimentos das culturas só é possível quando todos os fatores de produção são manejados corretamente, em grande parte do território brasileiro a produtividade das culturas é constantemente limitada pela falta de água. A utilização de irrigação para culturas como o milho tem permitido obter produtividades superiores a doze toneladas por hectares. Nesses casos, a deficiência de sulfato no solo pode ser um fator limitante e a sua adição pode ser uma forma eficiente de aumentar a produtividade, especialmente se houver alguma limitação física ou química do solo ao desenvolvimento radicular em profundidade. A disponibilidade de sulfato, também, pode ser o fator limitante para altas produtividades (Rehn, 2005).

No Brasil, em áreas de Cerrado, é necessária a aplicação de grandes quantidades de fertilizantes fosfatados, que, nem sempre, são aplicados simultaneamente com fontes de enxofre, devido ao uso de fórmulas concentradas de fertilizantes, tornando mais frequentes os problemas de deficiência de enxofre (Hitsuda et al. 2005) e colocando em risco a obtenção de altos rendimentos.

Espera-se que haja diferença entre a quantidade de calcário recomendada pelos métodos mais comuns de recomendação de calagem, afetando a disponibilidade de enxofre, e, conseqüentemente, a produtividade do milho (Melo et al. 2011).

Resultados de pesquisa com S não são muito frequentes no Brasil, pois para se conseguir isolar o efeito deste nutriente é preciso trabalhar com produtos puros, e muitas vezes o S é ou foi aplicado nas áreas cultivadas via fertilizantes compostos, como nutriente secundário, caso dos sulfatos e superfosfatos simples (Broch et al. 2011).

Resultados obtidos por Rheinheimer et al. (2005) evidenciaram que o uso de doses de  $\text{SO}_4^{2-}$  de até 60 kg ha<sup>-1</sup> via superfosfato simples, não afetam a produtividade

das culturas, as quais foram cultivadas na sequencia nabo forrageiro/milho/trigo/soja/canola/milho, resultados semelhantes foram observados por (Osório Filho et al. 2007) com os tratamentos citados anteriormente, não havendo resposta da soja a doses de fertilizantes sulfatados.

Alta solubilidade do sulfato e altas precipitações podem promover a lixiviação deste nutriente para camadas mais profundas, ou até sair do sistema explorado pelas raízes e ainda não existe uma referência no que diz respeito à dose ideal de S para as culturas (Broch et al. 2011).

## **2.10 Nutrição de plantas com enxofre**

A necessidade do enxofre (S) na nutrição mineral das plantas é conhecida desde os tempos de Liebig devido a sua participação em enzimas e formação de proteínas. A ocorrência de deficiência de S nas culturas está relacionada com o uso de fertilizantes concentrados com escassa ou nula presença desse nutriente; à utilização de solos arenosos com baixo conteúdo de matéria orgânica; à sistemas de cultivos intensivos em solos degradados; ao controle da contaminação ambiental e conseqüentemente menor aporte atmosférico de  $\text{SO}_4^{2-}$  e ao excesso de precipitação e irrigação, provocando erosão e lixiviação do S (Alvarez, 2004).

A necessidade de S para o bom crescimento das plantas varia de 1 a 5 g kg<sup>-1</sup> de matéria seca vegetal. As proteínas são os compostos nos quais a maior parte do S (e do N) se incorpora. O S desempenha funções que determinam o aumento na produção e na qualidade do produto obtido. Observa-se que ele esta intimamente ligada ao metabolismo do N, sendo inclusive utilizada a relação N/S da planta para avaliar o seu estado nutricional (Vitti & Trevisan, 2000).

O conteúdo de sulfato é um indicador bastante sensível ao *status* nutricional da planta em relação ao S, o baixo conteúdo de deste nas proteínas influencia consideravelmente a qualidade nutricional das plantas e considerado um fator limitante quando os grãos são considerados fonte principal de proteínas, o suprimento de S pode ser considerado favorável ou desfavorável às plantas, do ponto de vista qualitativo, e em alguns alimentos ocasiona um sabor mais acentuado e, em outros diminui sua palatibilidade (Portz, 2005).

Assim, por exercerem funções semelhantes aos apresentados pela deficiência de N, incluindo a clorose, no entanto, aparece primeiro nas folhas mais jovens, o que é conseqüência da baixa mobilidade do S no floema da planta. Todavia, em algumas

plantas a clorose ocorre ao mesmo tempo em todas as folhas ou pode até iniciar nas folhas mais velhas (Taiz & Ziegler, 2004).

Alguns estudos confirmam que a deficiência de enxofre, além de reduzir a síntese protéica e a produção de massa seca favorece o acúmulo de compostos nitrogenados não protéicos como nitratos e amidas, diminuindo o valor biológico da proteína bruta da planta (Cowling & Bristow, 1979; Millard, 1985).

A concentração de enxofre na totalidade do material vegetal ou de partes específicas desta permite diagnosticar o estado do elemento na planta, onde o teor crítico dependerá principalmente da espécie. Outros fatores que afetam a concentração de S na planta são a parte da planta amostrada, o estágio fenológico e o nível de fertilidade do solo onde se encontra estabelecida a cultura (Haneklaus & Schung, 1994; Hantonen & Saarela, 1995; Alvarez, 2004).

Nascimento et al. (2012) verificaram que além dos sintomas característicos de uma ou outra desordem, que só se manifestam em casos de gravidade acentuada, sendo a identificação do estado nutricional da planta possível pela análise química da mesma. A utilização da análise foliar como critério diagnóstico baseia-se na premissa de existir uma relação bem definida entre o crescimento e a produção das culturas e o teor dos nutrientes em seus tecidos.

A diagnose foliar tem sido utilizada nas seguintes situações (Martinez et al. 1999) na avaliação do estado nutricional da probabilidade de resposta às adubações, na verificação do equilíbrio nutricional, na constatação da ocorrência de deficiências ou toxidez de nutrientes, no acompanhamento, avaliação e ajuda no ajuste do programa de adubações, na ocorrência de salinidade elevada.

O estágio de desenvolvimento mais utilizado para a diagnose foliar do milho é o do florescimento que corresponde a onze semanas após a semeadura, por constituir uma fase de grande demanda de nutrientes para a maioria das variedades. Hiroce et al. (1979) demonstraram que existem diferenças genéticas na absorção de nutrientes e na eficiência de conversão dos elementos assimilados em produção de grãos de milho (Arnon, 1975).

### **2.11 Absorção e translocação de enxofre nas plantas**

A maior parte do enxofre assimilado pelas plantas é absorvida do solo pelas raízes, na forma de sulfato. Porém, as plantas podem acumular o enxofre como resultado da absorção foliar de óxidos de enxofre existentes no ar. O SO<sub>2</sub> contido na

atmosfera, o mais abundante entre os óxidos de enxofre, é absorvido prontamente pelas plantas através dos estômatos (Manninen et al.1996; Manninen & Huttunen, 2000).

O SO<sub>2</sub> absorvido pelas plantas provoca muitos efeitos bem estabelecidos, geralmente resultantes do acúmulo foliar de enxofre. São observadas, entre outros efeitos, alterações no movimento de estômatos, inibição de várias etapas da fotossíntese e da atividade de diversas enzimas (Deepak & Agrawal, 1999; Szabo et al. 2003).

O transporte de sulfato pode ocorrer tanto no xilema quanto no floema, sendo prontamente trocável entre essas vias (Larsson et al. 1991). Compostos contendo S reduzido podem ser transportados na direção acrópeta para as folhas em desenvolvimento, assim como na direção basípeta para o caule e as raízes (Herschbach & Rennenberg, 1995; Hartmann et al. 2000).

A interceptação radicular também seria responsável pelo suprimento de nutrientes às plantas. Barber (1984), entretanto, considera praticamente desprezível a sua participação no suprimento de enxofre. Patel et al. (1984) questionam o seu verdadeiro significado, uma vez que o efeito do alongamento da raiz está incluído nos modelos de difusão mais recentes (Silva et al. 1998).

Clarkson et al. (1983) comentam que o floema deve ter uma capacidade considerável de transportar S, uma vez que a redução do sulfato ocorre, principalmente, nas folhas, e as raízes são amplamente dependentes dessa via de transporte para a aquisição de aminoácidos contendo enxofre. Contudo, a entrada de sulfato no floema é restrita e a sua manutenção nas folhas velhas, mesmo sob condições de estresse de S, deve estar relacionada com esse fato. Essa imobilidade a partir das folhas velhas é um dos aspectos mais enigmáticos do papel do S na fisiologia da planta (Cram, 1990).

O estudo da absorção de nutrientes e do acúmulo de matéria seca na cultura do milho é de fundamental importância para subsidiar estratégias de definição das quantidades de adubações e das quantidades mínimas que devem ser restituídas ao solo para fins de manutenção da fertilidade. A extração de nutrientes depende da produtividade obtida e da acumulação de nutrientes nos grãos e em outras partes da planta. É necessário colocar à disposição da planta as quantidades de nutrientes extraídas, sendo que estas devem ser repostas pelo solo e pelas adubações (Pinho et al. 2009).

## **2.12 Absorção de nutriente e acúmulo de matéria seca em milho**

Entende-se por acúmulo de nutrientes as quantidades destes na matéria seca de cada parte da planta (raiz, folha, caule, palha, sabugo e grãos) e por absorção ou

extração de nutrientes, os totais dos acúmulos de nutrientes ocorridos nas diferentes partes da planta. A quantidade do elemento retirada da área de plantio pelos produtos da colheita é denominada exportação de nutrientes, o que depende a finalidade da cultura (produção de grão, milho verde ou forragem) (Malavolta et al. 1997).

Após a definição das doses de nutrientes a aplicar para a cultura, o passo seguinte é conhecer a absorção e a acumulação de nutriente nas diferentes fases de desenvolvimento da planta. Essa informação, associada ao potencial de perdas por lixiviação de nutrientes nos diferentes tipos de solos, auxilia da identificação da necessidade de aplicação, parcelada ou não, de fertilizantes (Borges, 2006).

A marcha de absorção de nutrientes na cultura do milho pode ser afetada pelo clima, pelas cultivares e pelos sistemas de cultivo. De modo geral, pode-se dizer que os nutrientes são absorvidos durante todo o ciclo, sendo as diferenças verificadas nas velocidades de absorção destes em função do ciclo e na sua translocação das folhas e dos colmos para os órgãos reprodutivos (Andrade et al.1975).

A absorção de nutrientes logo no início do ciclo da cultura do milho é mínima, pois as reservas contidas nas sementes são suficientes para as necessidades iniciais da planta (Stipp & Yamada, 1988). Nas três primeiras semanas após o plantio, quase não há absorção de minerais do solo, sendo os elementos contidos nas sementes mobilizados e translocados para as raízes e parte aérea. Apesar de pequena quantidade de nutrientes absorvidos no início do ciclo, as concentrações destes na região do solo que circunda as raízes da planta naquele estágio, geralmente, devem ser altas. Após este período inicial, diferenças na absorção e acúmulo de nutrientes começam a surgir, devido a fatores intrínsecos e extrínsecos à planta. (Borges, 2006).

### **2.13 Acúmulo de nutriente na folha e grãos de milho**

O órgão de controle escolhido mais freqüente é a folha, pois a mesma é a sede do metabolismo e reflete bem, na sua composição e nutrição, a utilização da análise foliar como critério diagnóstico. Baseia-se na premissa de existir uma relação significativa entre o suprimento de nutrientes e os níveis dos elementos, e que aumentos ou decréscimos nas concentrações se relacionam com produções mais altas ou mais baixas (Coelho & França, 2006).

A folha como regra geral, o órgão que melhor indica o estado nutricional da planta e permite avaliar, de forma indireta, a fertilidade do solo e a eventual necessidade de adubo. A folha usada para diagnose, bem como a faixa de teores foliar considerada adequada, varia de acordo com a espécie vegetal e com diversos fatores, a saber, como a

época e procedimento de coleta de amostras, potencial produtivo da lavoura e eficiência varietal. Informações sobre a amostragem para diagnose do estado nutricional das principais culturas podem ser encontradas, entre outros, por Mills & Jones Junior (1996), Malavolta et al. (1997) e Raij et al. (1996).

A avaliação do estado nutricional das plantas é considerada uma das ferramentas para prever a necessidade de aplicação de fertilizantes. O "status" de enxofre (S) na planta pode ser avaliado através de determinações analíticas de S no tecido, e ainda, através da diagnose visual do sintoma de deficiência que se caracteriza pelo amarelecimento das folhas mais jovens que evolui para clorose (Paiva & Nicodemo, 1994). O enxofre presente na planta em quantidades excedentes à requerida para a síntese de proteínas acumula-se no tecido vegetal na forma de sulfato (Paiva & Nicodemo, 1994).

Nas folhas de plantas de milho, o acúmulo de matéria seca é relativamente lento no início do desenvolvimento vegetativo, após este período, há incremento considerável na acumulação de matéria seca, que é máxima no florescimento (Hanway, 1962; Vasconcellos et al. 1983).

Além dos sintomas característicos de uma ou outra desordem que só e manifesta em casos graves, a identificação do nível nutricional da planta somente é possível pela análise química da mesma (Coelho & França, 2006).

Para observar a quantidade de nutrientes exportada pela cultura é importante analisar o teor do elemento no grão, caso sejam culturas comerciais, ou da planta inteira, no caso de culturas para uso na alimentação de animais ou silagens de forrageiras. (Gupta, 1976).

Em milho, os nutrientes têm diferentes taxas de translocação entre os tecidos (colmos, folhas e grãos). No que se refere à exportação dos nutrientes, o fósforo é quase todo translocado para os grãos (77 a 86%), seguindo-se o nitrogênio (70 a 77%), o enxofre (60%), o magnésio (47 a 69%), o potássio (26 a 43%) e o cálcio (3 a 7%). Assim, ao se planejar a adubação para cultura do milho é importante considerar, além dos resultados das análises de solo, e extração dos nutrientes pela cultura, finalidade de exploração (grãos ou forragem) e a estimativa do potencial de produtividade a ser alcançado. (Coelho, 2006).

#### **2.14 Avaliações da disponibilidade de S para as plantas**

A baixa disponibilidade de S no solo teoricamente é bastante generalizada, estima-se que 50% da área total dos solos da América Tropical apresentam deficiência

de S. No Brasil, vários solos apresentam baixo nível de S, especialmente aqueles arenosos e altamente intemperizados ocorrentes em áreas distantes do mar, de grandes metrópoles e de fábricas. Além disso, os baixos teores de MO, a destruição da vegetação permanente e a adição de calcário e fertilizante fosfatado favorecem as perdas de  $S-SO_4^{2-}$  por lixiviação (Alvarez, 2004).

A determinação da disponibilidade de enxofre no solo é dificultada em razão da multiplicidade de fontes e da contribuição variável de cada uma delas. Estas fontes incluem o S do solo, das chuvas, das águas de irrigação e dos fertilizantes e pesticidas (Paiva & Nicodemo, 1994).

O enxofre orgânico e o total não são parâmetros adequados para se avaliar a disponibilidade desse nutriente às plantas, em curto prazo, pois as raízes absorvem o enxofre na forma inorgânica, principalmente o sulfato, e não existem correlações entre este e os teores de enxofre orgânico e total (Tabatabai & Bremner 1972; Nascimento & Morelli 1980).

Solos que apresentam baixos teores de argila e óxidos como aqueles com baixos teores de matéria orgânica, podem apresentar baixa disponibilidade de enxofre e, por conseqüência, limitar a produtividade das culturas (Rheinheimer et al. 2005).

A correção da deficiência de enxofre pode ser feita diretamente pela adubação ou por meio de práticas que visem aumentar a disponibilidade desse nutriente, como a rotação de pastagens com culturas. Para isto, são necessários conhecimentos básicos que permitam fundamentar as recomendações (Paiva & Nicodemo, 1994).

Em áreas com altos tetos de produtividade, no caso de milho, pode ocorrer deficiência deste nutriente, sendo necessária a adição de S. O bom manejo do solo, aliado a adequada rotação de cultura, principalmente mediante a utilização de plantas com raízes agressivas como o nabo forrageiro, feijão de porco, mucuna preta e crotalaria como cultura anterior ao milho, pode ciclar parte do  $S-SO_4^{2-}$  que se encontra em profundidade, aumentando a disponibilidade deste, tanto pela reciclagem do nutriente, como pela mineralização da palhada do resíduo. Ainda promove o melhoramento das características físicas do solo, propiciando melhor condição para o crescimento radicular das culturas comerciais (Casas, 1999; Scivittaro et al. 2002).

Resultados obtidos em outros locais são contraditórios, dificultando o estabelecimento do nível crítico, das classes de disponibilidade, e, conseqüentemente, das recomendações adequadas de fertilizantes sulfatados. (Rheinheimer et al. 2007).



## 2.15 Incorporação do nutriente pela planta de milho

As plantas apresentam diferentes habilidades em absorver, translocar e utilizar o enxofre e, por isso exigem diferentes teores de  $\text{SO}_4^{2-}$  disponíveis no solo. Algumas plantas, como aquelas das famílias das leguminosas, brásicas e liliáceas só expressam seu potencial genético em termos de produtividade e qualidade quando a disponibilidade desse nutriente for alta, sendo então estabelecido um teor crítico de  $10 \text{ mg dm}^{-3}$  (CQFS-RS/SC, 2004).

O íon sulfato é a principal forma de S absorvida pelas plantas (Salisbury & Ross, 1992). Depois de ser absorvido, o sulfato é reduzido e incorporado em aminoácidos que são redistribuídos para as partes da planta em crescimento (Herschbach & Rennenberg, 1994).

A absorção de sulfato pelas raízes é um processo ativo, dependente de energia (Cram, 1990) mediado por distintos transportadores de sulfato, que estão presentes em diferentes tipos de células (Herschbach & Rennenberg, 2001). O sulfato é translocado através do xilema para as folhas, onde é incorporado a esqueletos carbônicos. O transporte de sulfato pode ocorrer tanto no xilema quanto no floema, sendo prontamente trocável entre essas vias (Larsson et al. 1991).

No milho, percebe-se que grande parte da radioatividade redistribuída a partir da raiz marcada foi encontrada no caule. As folhas superiores e as raízes receptoras apresentaram maior radioatividade com o aumento do tempo de redistribuição, indicando que essas partes da planta são drenos importantes para o enxofre. Nas plantas de milho, o S foi transportado, preferencialmente, para as raízes e para o caule. Esse S, possivelmente na forma de sulfato, foi retranslocado de maneira mais lenta para a parte aérea, onde pode ter sido reduzido e incorporado a esqueletos carbônicos nas folhas (Silva et al. 2003).

Em solos com apreciável capacidade de adsorção de sulfato, a taxa de absorção de S pelas plantas é menor que em solos com reduzida capacidade de adsorção, no entanto o suprimento de S é mais prolongado e constante naqueles solos. Isto ocorre devido ao S estar fracionado entre a fase sólida e líquida em solos que adsorvem sulfato, sendo transferido para solução do solo gradativamente (Barrow, 1969).

O carregamento no xilema é controlado mais pela demanda da parte aérea do que pela absorção de S, a transferência de sulfato e de compostos contendo S reduzido entre o xilema e o floema é particularmente importante no transporte de S, uma vez que esse nutriente é retido nas folhas velhas com maior intensidade do que em outras partes

da planta. Clarkson et al. (1983) comentam que o floema deve ter uma capacidade considerável de transportar S, uma vez que a redução do sulfato ocorre, principalmente, nas folhas, e as raízes são amplamente dependentes dessa via de transporte para a aquisição de aminoácidos contendo enxofre. Contudo, a entrada de sulfato no floema é restrita e a sua manutenção nas folhas velhas, mesmo sob condições de estresse de S, deve estar relacionada com esse fato. Silva et al. (2003). Essa imobilidade a partir das folhas velhas é um dos aspectos mais enigmáticos do papel do S na fisiologia da planta (Cram, 1990).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVAREZ V, V. H. ROSCOE, R. KURIHARA, C. H. PEREIRA, N. de F. Enxofre. In: NOVAIS, R. F. ALVAREZ V. V. H. BARROS, N. F. de. FONTES, R. L. F. CANTARUTTI, R. B. NEVES, J. C. L. (Eds). Fertilidade do solo. P. 595-644. Viçosa: SBCS. 2007.

ALVAREZ, J. W. R. Disponibilidade e resposta de culturas ao enxofre em solos do Rio Grande do Sul. PPGCS – Dissertação de Mestrado. UFSM. Santa Maria, RS, Brasil. 2004. ALVAREZ, J. W. R. Disponibilidade e resposta de culturas ao enxofre em solos do Rio Grande do Sul. 2004. 84 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo). Universidade Federal de Santa Maria, 2004.

ALWAYS, F. J. MARSH, A. W. METHLEY, W. J. Sufficiency of atmospheric sulfur for maximum crop yields. Soil Science Society American Proceeding, Madison, v.2, p.229-238, 1937.

ANDRADE, A. G. DE. HAAG, H. P. OLIVEIRA, G. D. D. SARRUGE, J. R. Acumulação diferencial de nutrientes em cinco cultivares de milho (*Zea mays*). Crescimento. Anais da Escola Superior de Agricultura Luis de Queiroz, Piracicaba, v. 32, p. 115-149, 1975.

ARNON, I. Determining fertilizer requirements. In: Mineral nutrition of maize. p. 245-249. Bern, International Potash Institute, 1975.

BARROW, N. J. Effects of adsorption of sulfate by soils on the amount of sulfate present and its availability to plants. Soil Science, Baltimore, v.108, n.3, p.193- 201, 1969.

BARROW, N. J. Slowly available sulphur fertilizers in southwestern Australia. I. Elemental sulphur. Australian Journal of Experimental Agriculture and Animal Husbandry, Collingwood, v.2, p.211-216, 1971.

BARROW, N. J. Studies on extraction and on availability to plants of adsorbed plus soluble sulfate. Soil Science, Baltimore, v. 104, p. 242-249, 1967.

BOARO, V. SCHWARZ, S. F. SOUZA, P. V. D. D. SOARES, W. LOUROS, G. V. Enxofre elementar no manejo do pH de substrato orgânico alcalino. Ciência Rural, Santa Maria, v. 44, n.12, p. 2111-2117, dez, 2014.

- BORGES, I. D. Marcha de absorção de nutrientes e acúmulo de matéria em cultivares de milho / Iran Dias Borges - Lavras: UFLA, 2006.
- BROCH, D. L. PAVINATO, P. S. JEAN, C. P. THOMAS, N. M. ERCI, M. DEL Q. Produtividade da soja no cerrado influenciada pelas fontes de enxofre. *Revista Ciência Agrônômica*, v. 42, n. 3, p. 791-796, jul - set, 2011.
- CAIRES, E. F. GARBUIO, F. J. CHURKA, S. JORIS, H. A. W. Use de gypsum for crop grain production under a subtropical no-till cropping system. *Agronomy Journal*, Madison, v. 103, n. 6, p. 1804-1814, 2011.
- CANTARELLA, H. Nitrogênio. In: NOVAIS, R. F. ALVAREZ, V. V. H. CANTARUTTI, R. B. NEVES, J. C. L. (Ed.). *Fertilidade do Solo*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p.375-470.
- CASAGRANDE, J. C. SOUZA, O. C. DE. Efeito de níveis de S sobre quatro gramíneas forrageiras tropicais; em solos sob vegetação de cerrado do Estado de Mato Grosso do Sul, Brasil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 1, n. 2, p. 21-25, 1982.
- CASAS, A. F. Efecto de la fertilización en dos abonos verdes y su incidencia en los suelos y en los rendimientos del cultivo siguiente. Universidad del Tolima. Ibagué, Perú, 20 p, 1999.
- CHAO, T. T. Cationic effects on sulfate adsorption by soils. *Soil Science Society of America Proceedings*, Madison, v.27, p. 35-38, 1963.
- CHAO, T. T. HARWARD, M. E. FANG S. C. Soil constituents and properties in the absorption of sulfate ions. *Soil Science*, Oxford, v.94, p.276-286, 1962.
- CHEN, P. J. Sulfur deposition and sulfur balance in Sichuan basin. In: State environment protection agency. *Study on air pollution prevention and control technology*. Beijing: Science, p 640–645. 1993.
- CLARKSON, D. T. SMITH, F. W. BERG, P. J. Regulation of sulfate transport in a tropical legume, *Macroptilium atropurpureum*, cv. Siratro. *Journal of Experimental Botany*, Oxford, v. 34, p. 1463-1483, 1983.
- COELHO, A. M. FRANÇA, G. E. DE EXEL PITTA, G. V. ALVES, V. M. C. HERNAN, L. C. Embrapa Milho e Sorgo. *Sistemas de Produção. Fertilidade de solos* ISSN 1679-012X Versão Eletrônica - 4ª edição Set/2008.
- COELHO, A. M. FRANÇA, G. E. *Nutrição e adubação do milho*. Pesquisadores da Embrapa Milho e Sorgo, 2006.
- COELHO, A. M. *Solos e Nutrição de Plantas*. Embrapa Milho e Sogro, Circular Técnico, Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento – 157, Sete lagoas – MG, 2006.
- COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO – RS/SC. *Manual de adubação e de calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina*. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2004. 394p.

COSTA, C. A. S. Mineralização do S orgânico e adsorção de sulfato em solos. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal do Rio do Grande do Sul. 1980.

COUTO, W. LATHWELL, D. J. BOULDIN, D. R. Sulfate sorption by two oxisols and an alfisol of the tropic. *Soil Science*, Baltimore, v. 127, p. 108-116, 1979.

COWLING, D. W. BRISTOW, A. W. Effects of SO<sub>2</sub> on sulphur and nitrogen fractions and on free amino acids in perennial ryegrass. *J. Sci. Food Agric.* v.30, p. 354-360, 1979.

CRAM, W. J. Uptake and transport of sulfate. In: RENNENBERG, H. BRUNOLD, C. DE KOK, L. J. STULEN, I. (Ed.). Sulfur nutrition and sulfúur assimilation in higher plants: fundamental, environmental and agricultural aspects. p. 3-11. The Hague: SPB Academic, 1990.

DANELON, O. M. MOREIRA-NORDEMANN, L. M. Ocorrência natural e antropogênica de Cl<sup>-</sup>, Na<sup>+</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> e SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> na Bacia do Rio Quilombo (Cubatão, SP). *Revista Brasileira de Geociências*, Brasília, v. 21, n. 1, p. 96-101, 1991.

DEEPAK, S. S. e AGRAWAL, M. Growth and yield responses of wheat plants to elevated levels of CO<sub>2</sub> and SO<sub>2</sub> singly and in combination. *Environmental Pollution* 104:411-419, 1999.

DUARTE, A. P. CANTARELLA H. Adubação em sistemas de produção de soja e milho safrinha. Programa Milho IAC/APTA, Apta Regional do Médio Paranapanema, ASSIS, SP. Centro de P&D de Solos e Recursos Ambientais. Caixa Postal 28, 13001-970 Campinas, SP. 2008.

ELKINS, D. M. ENSMINGER, L. E. Effects of soil pH on the availability of adsorbed sulfate. *Soil Science Society of America Proceedings*, Madison, v.25, n.6, p.931-934, 1971.

ELSMINGER, L. E. FRENEY, J. R. Diagnostic techniques for determining sulfur deficiencies in crops and soils. *Soil Science*, Baltimore, v.101, p. 283-290, 1966.

ENSMINGER, L. E. Some factors affecting the absorption of sulfate by Alabama. *Soil Science Society American Proceeding.* v.18, p. 259-264, 1954.

ERIKSEN, J. ASKEGAARD, M. Sulphate leaching in an organic crop rotation on sandy soil in Denmark. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v.78, n.1, p.107-114, 2000.

ERIKSEN, J. OLESEN, J. E. ASKEGAARD, M. Sulphate leaching and sulphur experiment with a Black Forest soil. *Soil Biology & Biochemistry*, v. 34 p. 1425–1438, 2002.

FAQUIM, V. HOFFMAN, C. R. EVANGELISTA, A. R. GUEDES, G. A. A. O potássio e o enxofre no crescimento da braquiária e do colônio em amostras de um Latossolo da região noroeste do Paraná. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 19, p. 87-94, 1995.

FOX, R. L. OLSON, R. A. ROADES, H. F. Evaluating the sulphur status of soil by plant and soil tests. Soil Science Society American Proceeding. Madison, v. 28, p. 243-246, 1964.

GERMIDA, J. J. JANZEN, H. H. Factors affecting the oxidation of elemental sulfur in soils. Fertilizer Research, Wageningen, v. 35, p. 101-114, 1993.

GUEDES, R. M. M. Enxofre e nitrogênio na água da chuva e enxofre atmosférico na região metropolitana de Porto Alegre (RS), Brasil. 1985. 117 p. Tese (Mestrado em Ecologia) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Faculdade de Agronomia, 1985.

GUPTA, U. C. Tissue sulfur levels and additional sulfur needs for various crops. Canadian Journal Plant Science, Ottawa, v. 56, p. 651-657, 1976.

HAHTONEN, M. SAARELA, I. The effects of sulfur application on yield, sulfur-content and N/S-ratio of grasses for silage at six sites in Finland. Soil and Plant, Crawley, v. 45, p. 104-111, 1995.

HANEKLAUS, S. E. SCHUNG, E. Diagnosis of sulphur status and application of X-ray fluorescence spectroscopy for the sulphur determination in plant and soil materials. Sulphur Agricultural, Washington, v. 18, p. 31-40, 1994.

HANWAY, J. J. Corn growth and composition in relation to soil fertility: In. Growth of different plant parts and relation between leaf weight and grain yield. Agronomy Journal, Madison, v. 54, n. 2, p. 145-148, Mar/Apr. 1962.

HARTMANN, T. MULT, S. SUTER, M. RENNENBERG, H. HERSCHBACH, C. Leaf agedependent differences in sulfur assimilation and allocation in poplar (*Populus tremulax* P. alba) leaves. Journal of Experimental Botany, Oxford, v. 51, p. 1077-1088, 2000.

HARWARD, M. E. REISENAUER, H. M. Reaction and movement of inorganic soil sulfur. Soil Science, Baltimore, p.326-335, 1966.

HERSCHBACH, C. DE KOK, L. J. RENNENBERG, H. Net uptake of sulphate and its transport to shoot in spinach plants fumigated with H<sub>2</sub>S or SO<sub>2</sub>. Does atmospheric sulfur affect the "inter-organ" regulation of sulfur nutrition. Botânica Acta, Stuttgart, v. 108, p. 41-46, 1995a.

HERSCHBACH, C. DE KOK, L. J. RENNENBERG, H. Net uptake of sulphate and its transport to shoot in tobacco plants fumigated with H<sub>2</sub>S or SO<sub>2</sub>. Plant and Soil, Dordrecht, v. 175, n. 1, p. 75-84, Aug. 1995 b.

HERSCHBACH, C. RENNENBERG, H. Influence of glutathione (GSH) on net uptake of sulfate and its transport in tobacco plants. Journal of Experimental Botany, Oxford, v. 45, p. 1069-1079, 1994.

HERSCHBACH, C. RENNENBERG, H. Sulfur nutrition of deciduous trees. Naturwissenschaften, Berlin, v. 88, p. 25-36, 2001.

HEYDARNEZHAD F. SHAHINROKHSAR P. SHOKRI VAHED H. Influence of elemental sulfur and sulfur oxidizing bacteria on some nutrient deficiency in calcareous soils. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences* 2012. Volume 12, Number 4. Page 735-739. 2012.

HIROCE, R. Extração de nutrientes pelo milho aos 65 dias após o plantio e pelas sementes na colheita. *Bragantia*, v.38, n.1, p.1-4, 1979.

HITSUDA, K. YAMADA, M. KLEPKER, D. Sulfur requirement of eight crops at early stages of growth. *Agronomy Journal*, Madison, v. 97, n. 1, p. 155-159, 2005.

HOROWITZ, N. MEURER, E. J. Oxidação do enxofre elementar em solos tropicais. *Ciência Rural*, v. 36, n. 03, p. 822-828, 2006.

HOROWITZ, N. Oxidação e eficiência agrônômica do enxofre elementar em solos do Brasil. 2003. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

JORDAN, H. V. ENSMINGER, L. E. The role of sulphur in soil fertility. *Advance in Agronomy*, Madison, v.10, p.407-434, 1958.

KORENTAJER, L. BYRNES, B. H. HELLUMS D. T. The effect of liming and leaching on the sulfur supplying capacity of soil. *Soil Science Society American Journal*, v.47, p.525-530, 1983.

LARSSON, C. M. LARSSON, M. PURVES, J. V. CLARKSON, D. T. Translocation and cycling through roots of recently absorbed nitrogen and sulfur in wheat (*Triticum aestivum*) during vegetative and generative growth. *Physiologia Plantarum*, Copenhagen, v. 82, p. 345-352, 1991.

LOPES, A. S. & GUILHERME, L. R. G. Fertilidade do solo e produtividade agrícola. Departamento de Ciência do Solo, Universidade Federal de Lavras – UFLA. Caixa Postal 37, CEP 37200-00 Lavras (MG), 2007.

MALAVOLTA, E. VITTI, G. C. OLIVEIRA, S. A. Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. 319. p. 2. ed. Piracicaba-SP: POTAFOS, 1997.

MANNINEN, S. & HUTTUNEN, S. Response of needle sulphur and nitrogen concentrations of Scots pine versus Norway spruce to SO<sub>2</sub> and NO<sub>2</sub>. *Environmental Pollution* 107:421-436, 2000.

MANNINEN, S. HUTTUNEN, S. RAUTIO, P. RERÄMÄKI, P. Assessing the critical levels of SO<sub>2</sub> for Scots pine in situ. *Environmental Pollution* 93:24-38. 1996.

MARTINEZ, H. E. P. CARVALHO, J. G. SOUZA, R. B. Diagnose foliar. In: RIBEIRO, A.C. GUIMARÃES, P. T. G. ALVAREZ, V. V. H. (Ed.). *Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais (5ª Aproximação)*. p.143-168. Viçosa, MG: CFSEMG/UFV, 1999.

McCLUNG, A. C. QUINN, L. R. Resposta da grama batatais (*Paspalum notatum*) às aplicações de S e fósforo. *IBEC Research Institute*, New York, 1959. 16 p. (Boletim técnico, 18).

- MELO, L. C. A. AVANZI, J. C. CARVALHO, R. SOUZA, F. S. D. PEREIRA, J. L. A. R. MENDES, A. D. R. MACÊDO, G. B. Nutrição e produção de matéria seca de milho submetido a calagem e adubação sulfatada. 1983-4063 www.agro.ufg.br/pat - Pesq. Agropec. Trop. Goiânia, v. 41, n. 2, p. 193-199, abr/jun. 2011.
- MIELNICZUK, J. RHEINHEIMER, D. S. VEZZANI, F. M. Interações fertilidade e conservação do solo. In: FERTBIO 2000, Santa Maria: SBCS, 2000 (CD-ROM). 15p
- MILLARD, P. SHARP, G. S. SCOTT, N. M. The effect of sulphur deficiency on the uptake and incorporation of nitrogen in ryegrass. *J. Agric. Sci.* v.105, p.501-504, 1985
- MILLS, H. A. JONES JUNIOR, J. B. Plant analysis hard book II. Athens: Micromacro Publishing, 1996. 422p.
- MOREIRA-NORDEMANN, L. M. DANELON, O. M. FORTI, M. C. ESPÍRITO SANTO, C. M. SARDELA, D. D. LOPES, J. C. MASET, B. ABBAS, M. M. Caracterização química das águas de chuva de Cubatão. São Paulo, INPE. 63 p. (Rel. INPE-3965 - RPE/515). 1986.
- NASCIMENTO, F. M. BICUDO, S. J. FERNANDES, D. M. RODRIGUES, J. G. L. FERNANDES, J. C. Diagnose foliar em plantas de milho em sistema de semeadura direta em função de doses e épocas de aplicação de nitrogênio. *Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias, Guarapuava-PR*, v.5, n.1, p.67-86, 2012.
- NASCIMENTO, J. A. L. MORELLI, M. Enxofre em solos do Rio Grande do Sul. Formas no solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas*, v.4, n.3, p.131-135, 1980.
- ORMAN, S. KAPLAN, M. Effects of elemental sulfur and farmyard manure on pH and salinity of calcareous sandy loam soil and some nutrient elements in tomato plant. *Journal of Agricultural Science and Technology*, v.5, p.20-26, 2011.
- OSÓRIO FILHO, B. D. Dinâmica de enxofre no sistema solo e resposta das culturas à adubação sulfatada – Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Santa Maria, RS, Brasil, 2006.
- OSÓRIO FILHO, B. D. RHEINHEIMER, D. D. S. SILVA, L. S. KAMINSKI J. DIAS, G. F. Deposição do enxofre atmosférico no solo pelas precipitações pluviais e respostas de culturas à adubação sulfatada em sistema plantio direto. *Ciência Rural*, v.37, n.3, mai - jun, 2007. *Ciência Rural, Santa Maria*, v.37, n.3, p.712-719.
- ÖSTERHOLM, P. ASTRÖM, M. Quantification of current and future leaching of sulfur and metals from Boreal acid sulfate soils, western Finland. *Australian Journal of Soil Research* 42(6)547-551. September, 2004.
- PAIVA, P. J. R. NICODEMO, M. L. F. Enxofre no sistema solo-planta-animal. Ministério da agricultura do abastecimento e da reforma agrária. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Gado de Corte - CNPGC. Campo Grande, MS, 1994.

- PARFITT, R. L. SMART, R. S. C. The mechanism of sulfate absorption of iron oxides. *Soil Science Society American Journal*, Madison, v. 42, p. 48-50, 1978.
- PATEL, C. L. GHILYAL, B. P. & TOMAR, V. S. Nutrient flow rates in rice roots under varying drainage conditions. *Plant Soil*, 77:243-252, 1984.
- PAULETTI, V. L. PIERRI, T. RANZAN, G. BARTH & A. C. V. MOTTA. Efeitos em longo prazo da aplicação de gesso e calcário no sistema de plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 2014.
- PAVAN, M. A. BINGHAM, F. T. PRATT, P. F. Redistribution of exchangeable calcium, magnesium and aluminium following lime or gypsum applications to a Brazilian oxisol. *Soil Science Society American Journal*, Madison, v. 48, p. 33-38, 1984.
- PEAK, D. FORD, R. G. SPARKS, D. L. An in Situ ATR-FTIR Investigation of Sulfate Bonding Mechanisms on Goethite. *Journal of Colloid and Interface Science*, v.218, p.289-299, 1999.
- PINHO, R. G. V. BORGES, I. D. PEREIRA, J. L. DE A. R. REIS, M. C. D. Marcha de absorção de macronutrientes e acúmulo de matéria seca em milho. *Revista Brasileira de Milho e Sorgo*, v.8, n.2, p. 157-173, 2009.
- PORTZ, A. Produção de clones de mandiocinha-salsa (*Arracacia xanthorrhiza* Bancroft) em diferentes manejos de fertilizantes. Seropédica, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2005. 122p. (Tese de doutorado). In: VITTI G. C. LIMA, E. CICARONE, F. XII – Cálcio, Magnésio e Enxofre. SBCS, Viçosa, 2006. *Nutrição Mineral de Plantas*, 432p. (ed. FERNANDES, M. S.)
- QUAGGIO, J. A. DECHEN, A. R. RAIJ, B. V. Efeitos da aplicação de calcário e gesso sobre a produção de amendoim e lixiviação de bases no solo. *Revista Brasileira de Ciências do Solo*, Campinas, v. 8, p. 189-194, 1982.
- QUAGGIO, J. A. RAIJ, B. VAN. GALLO, P. B. MASCARENHAS, H. A. A. Respostas da soja à aplicação de calcário e gesso e lixiviação de íons no perfil do solo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 28, n. 3, p. 375-383, 1993.
- RAIJ, B. V. Fertilidade do solo e adubação. Piracicaba: CERES/POTAFÒS, 343p. 1991.
- RAIJ, B. VAN. CANTARELLA, H. Milho para grãos e silagem. In: RAIJ, B. VAN. CANTARELLA, H. QUAGGIO, J. A. FURLANI, A. M. C. (Ed.). *Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo*. 2. ed. Campinas: Instituto Agrônomo, 1996. p.56-59. (Boletim Técnico, 100).
- REHM, G. W. Sulfur Management for Corn Growth with Conservation Tillage. Published in *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69:709-717, 2005.
- RHEINHEIMER, D. D. S. ALVAREZ, J. W. R. OSÓRIO FILHO, B. D. SILVA, L. S. DA. BORTOLUZZI, E. C. Resposta de culturas à aplicação de enxofre e a teores de sulfato num solo de textura arenosa sob plantio direto. *Ciência Rural*, Santa Maria, v.35, n.3, p.562-569, mai-jun, 2005.



RHEINHEIMER, D. D. S. RASCHE, J. W. A. OSÓRIO FILHO, B. D. SILVA, L. S. DA. Resposta à aplicação e recuperação de enxofre em cultivos de casa de vegetação em solos com diferentes teores de argila e matéria orgânica. *Ciência Rural*, Santa Maria, v.37, n.2, p.363-371, mar - abr, 2007. ISSN 0103-847.

RITCHEY, K. D. SOUZA, D. M. G. LOBATO, E. CORREA, O. Calcium leaching to increase rooting depth in a Brazilian savannah oxisol. *Agronomic Journal*, Madison, v.72, p. 40-44, 1980.

SALISBURY, F. B. ROSS, C. W. *Plant physiology*. 4 th ed. Belmont: Wadsworth, 682p. 1992.

SCIVITTARO, W. B. MURAOKA, T. BOARETTO, A. E. Dinâmica do enxofre (35S) proveniente da mucuna preta em um sistema solo-planta. *Revista Terra*, México. v. 20, p. 25-32, 2002.

SIERRA, C. B. LANCELLOTTI, A. VIDAL, I. Azufre elemental como corrector del pH y la fertilidad de algunos suelos de la III y IV región de Chile. *Agricultura Técnica*, v.67, n.2, p.173-181, 2007.

SILVA, D. J. ALVAREZ, V. H. V. RUIZ, H. A. Fluxo de massa e difusão de enxofre para raízes de milho em solos ácidos de Minas Gerais. *R. Bras. Ci. Solo*, 22:109-114, 1998.

SILVA, D. J. VENEGAS, V. H. A. RUIZ, H. A. SANT'ANNA, R. Translocação e redistribuição de enxofre em plantas de milho e de soja. *Pesq. Agropec. Bras.*, Brasília, v. 38, n. 6, p. 715-721, jun. 2003.

SOUZA, D. M. G. Resposta das culturas à adição de gesso agrícola, Lages, SC, 2004. In: FERTBIO, 2004, Lages, SC. *Anais Lages: SBCS*, 2004.

STEWART, B. A. PORTER, L. K. Nitrogen-sulfur relationships in wheat (*Triticum aestivum*, L.), corn (*Zea mays*), and beans (*Phaseolus vulgaris*). *Agronomy Journal*, Madison, v. 61, n. 2, p. 267-271, Mar./Apr. 1969.

STIPP, S. R. CASARIN, V. A importância do enxofre na agricultura brasileira. *Informações Agronômicas*. 2010.

STIPP, S. R. YAMADA, T. Nutrição e adubação do milho. *Informações Agronômicas*, Piracicaba, v. 44, p. 3-6, dez. 1988.

SZABO, A. V. DOMINGOS, M. RINALDI, M. C. S. DELITTI, W. B. C. Acúmulo foliar de enxofre e suas relações com alterações no crescimento de plantas jovens de *Tibouchina pulchra* Cogn. (Melastomataceae) expostas nas proximidades do polo industrial de Cubatão, SP. *Revista Brasil. Bot.* V.26, n.3, p.379-390, jul - set, 2003.

TABATABAI, M. A. BREMNER, J. M. Forms of sulfur, and carbon, nitrogen and sulfur relationship, in Iowa soils. *Soil Science*, Baltimore, v.114, n.5, p.380-386, 1972.

TAIZ, L. ZEIGER, E. *Fisiologia vegetal*. , 719 p3. ed. Porto Alegre: Artmed, 2004.

TEIXEIRA, G. M. Recuperação do  $^{34}\text{S}$ , aplicado ao solo em cultivo sucessivo ao milho ou soja e alfafa/Gleuber Mariano Teixeira – Piracicaba, 77p. São Paulo, 2004.

TIECHEY, T. SANTOS D. R. D. RASCHE, J. W. A. BRUNETO, G. MALLMAN, F. J. K. PICCIN. Resposta de culturas e disponibilidade de enxofre em solos com diferentes teores de argila e matéria orgânica submetidas à adubação sulfurada. *Bragantia*, Campinas, v. 71, n. 4 p. 518-527, 2012.

VASCONCELLOS, C. A. BARBOSA, J. V. A. SANTOS, H. L. DOS. FRANÇA, G. E. D. Acumulação de massa seca e de nutrientes por dois híbridos de milho com e sem irrigação suplementar. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 18, n. 8, p. 887-901, ago. 1983.

VITTI, G. C. TREVISAN, W. Manejo de macro e micronutrientes para alta produtividade de soja: Informações Agronômicas. Manejo de macro e micronutrientes para alta produtividade de soja: Informações Agronômicas 90 (2000).

VITTI, G. C. Uso eficiente o gesso agrícola na agropecuária. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queros”, 30p. 2000.

WANG, T. J. HU, Z. Y. XIE, M. Y. ZHANG C. K. XU Z. H. Chao. Atmospheric sulfur deposition onto different ecosystems over China. *Environmental Geochemistry and Health*, v.26, p.169–177, 2004.

YAMADA, T. ALBADALLA, S. R. S. VITTI, C. Nitrogênio e Enxofre na Agricultura Brasileira, Piracicaba, IPNI Brasil - SP, 722 p, 2007.

ZHAO, F. T. HAWKESFORD, M. T. WARRILOW, A. G. S. McGRANTH, S. P. CLARKSON, D. T. Responses of two wheat varieties to sulphur addition and diagnosis of sulphur deficiency. *Plant and Soil*, Crawley, v. 181, p. 317-327, 1996.

## CAPÍTULO 2

### DISPONIBILIDADE NO SOLO E TEOR DE MACRONUTRIENTES EM FOLHAS, GRÃOS E PRODUTIVIDADE DE MILHO SOB FERTILIZAÇÃO COM ENXOFRE

#### RESUMO

LOPES, RICARDO DOS SANTOS. **Disponibilidade no solo e teor de macronutrientes em folhas, grãos e produtividade de milho sob fertilização com enxofre.** 2017. Cap. 2, p.30-55) Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal do Piauí, PI<sup>1</sup>.

**Resumo** - As necessidades nutricionais das plantas são determinadas pelas quantidades de nutrientes absorvidos, e o conhecimento dessas quantidades permite estimar as taxas exportação e formas de adubação disponibilizando adequadamente o nutriente as culturas. Desse modo, objetivou-se determinar os teores de macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg e S), na folha, grãos de milho e solo em função da disponibilidade dos nutrientes para a cultura do milho e os teores em profundidade no solo com a adubação de enxofre. O experimento foi conduzido na Serra do Quilombo, no município de Bom Jesus – PI. O delineamento experimental utilizado foi blocos ao acaso, com 4 repetições. Os tratamentos foram dispostos em esquema fatorial 3 x 4 + 1. Sendo três fontes de enxofre utilizadas: o gesso, o superfosfato simples e o sulfurgran, nas doses 15, 30, 45 e 60 kg ha<sup>-1</sup> de S a lançar antes do plantio, e o tratamento adicional sem enxofre. Foram avaliados os seguintes parâmetros, teores de macronutrientes nas profundidades de 0-20 e 20-40 cm do solo, teor do macronutrientes na folha e grãos de milho, relação entre produtividade e teor de enxofre exportado. Os adubos contendo enxofre não influenciaram no valor de pH em nenhuma das fontes e doses avaliadas, não foram significativas para as profundidades. O sulfato é transportado pelo perfil do solo. O sulfurgran disponibilizou quantidade de sulfato menor em comparação com as outras duas fontes. O acúmulo de sulfato na cultura do milho segue um padrão similar ao do N, entretanto as quantidades totais de enxofre acumulado são inferiores. A maior absorção entre os macronutrientes no grão se deu com a utilização do adubo sulfurgran.

**Palavras-chave:** Exigência nutricional, produtividade, fertilidade do solo, (*Zea Mays*).

---

<sup>1</sup> Orientador: Márcio Cleto Soares de Moura – CCN/UFPI

## CHAPTER 2

### AVAILABILITY IN SOIL AND MACRONUTRIENT CONTENT IN LEAVES, GRAINS AND CORN PRODUCTIVITY UNDER SULFUR FERTILIZATION

#### ABSTRACT

LOPES, RICARDO DOS SANTOS. **Soil availability and macronutrient content in leaves, grains and corn yield under sulfur fertilization.** 2017. Chapter 2, p.30-55 Dissertation (Masters in Soils and Plant Nutrition) - Federal University of Piauí, PI.

**Abstract** - The nutritional needs of plants are determined by the amount of nutrients absorbed, and the knowledge of these quantities makes it possible to estimate the export rates and forms of fertilization by adequately providing the nutrient to the crops. The objective of this study was to determine the macronutrient (N, P, K, Ca, Mg and S) contents in the leaf, corn and soil grains, according to the availability of nutrients for maize and depth Soil with sulfur fertilization. The experiment was conducted in the Serra do Quilombo, Bom Jesus - PI municipality. The experimental design was a randomized complete block, with 4 replicates. The treatments were arranged in factorial scheme 3 x 4 + 1. Three sources of sulfur were used: gypsum, single superphosphate and sulfurran at 15, 30, 45 and 60 kg ha<sup>-1</sup> of S before planting, and the additional treatment without sulfur. The following parameters were evaluated: macronutrient contents at depths of 0-20 and 20-40 cm of the soil, macronutrients content in the leaf and corn grains, relationship between productivity and exported sulfur content. Sulfur containing fertilizers do not influence the pH value in any of the sources and doses evaluated, were not significant for the depths. The sulfate is transported by the soil profile. Sulfur yielded less sulphate compared to the other two sources. The accumulation of sulfate in the corn crop follows a pattern similar to that of the N, however, the total amount of accumulated sulfur is lower. The highest absorption of macronutrients in the grain occurred with the use of sulfur ferric fertilizer.

**Key words:** Nutritional requirement, productivity, soil fertility, (Zea Mays).

---

<sup>1</sup>Advisor: Márcio Cleto Soares de Moura – CCN/UFPI

## 1. INTRODUÇÃO

O enxofre é um nutriente importante para o crescimento de raízes no milho. Há uma estreita relação entre o teor foliar de enxofre e a produção relativa de grãos na cultura do milho (Borges, 2006). O enxofre é acumulado durante todo o ciclo da cultura do milho, principalmente durante o estágio de desenvolvimento reprodutivo na espiga e no pedúnculo, o que requer adequada fertilização que possibilite disponibilizar tardiamente esse nutriente à cultura (Karlen, 1988; Borges, 2006).

As plantas, apesar de serem aptas a absorverem S foliar, obtêm a maioria desse elemento via radicular. A maioria do S encontrado nas células é absorvida da solução do solo como  $\text{SO}_4^{2-}$ . O S é transportado até o sistema radicular, principalmente por fluxo de massa (Silva et al. 2002).

O milho apresenta maior absorção de S por grama de matéria seca na raiz e retém a maior parte desses S na própria raiz. O íon sulfato é a principal forma de S absorvida pelas plantas, depois de ser absorvido, o sulfato é reduzido e incorporado em aminoácidos que são redistribuídos para as partes da planta em crescimento (Silva et al. 2003).

O sulfato é translocado através do xilema para as folhas, onde é incorporado aos esqueletos carbônicos. O transporte de sulfatos pode ocorrer tanto no xilema quanto no floema. O carregamento do xilema é controlado mais pela demanda da parte aérea do que pela absorção de S. A transferência de sulfatos e de compostos contendo S reduzido entre o xilema e o floema é particularmente importante no transporte de S, uma vez que esse nutriente é retido nas folhas velhas com mais intensidade do que em outras partes da planta (Fiorini, 2011).

A absorção de sulfato e o carregamento de sulfato no xilema são processos independentes, mediados por diferentes sistemas de transporte. O carregamento no xilema é controlado mais pela demanda da parte aérea do que pela absorção de S (Herschbach et al. 1995a, 1995b). Clarkson et al. (1983) comentam que o floema deve ter uma capacidade considerável de transportar S, uma vez que a redução do sulfato ocorre, principalmente, nas folhas, e as raízes são amplamente dependentes dessa via de transporte para a aquisição de aminoácidos contendo enxofre.

A marcha de absorção de nutrientes seja afetada por clima, cultivares e sistemas de cultivo, de modo geral, pode-se dizer que os nutrientes são absorvidos durante todo o ciclo, sendo as diferenças verificadas nas velocidades de absorção destes em função do

ciclo e na sua translocação das folhas e dos colmos para os órgãos reprodutivos. (Coelho & França, 1995).

Conhecer como ocorre o acúmulo de nutriente em cada uma dessas partes durante o ciclo é de fundamental importância para o conhecimento de dinâmica da relação fonte-dreno e, conseqüentemente, para o estabelecimento de parâmetros de avaliação do seu estado nutricional e na definição de estratégias de fertilização da cultura (Barbosa Filho, 1987; Borges, 2006).

No milho, assim como em qualquer planta, são determinadas pela quantidade total de nutrientes absorvidos. O conhecimento dessas quantidades permite estimar as taxas que serão exportadas através da colheita de grãos e as que poderão ser restituídas ao solo por meio dos restos culturais (Bull & Cantarella, 1993) trazem uma marcha de absorção de nutrientes para cinco variedades de milho e afirma que o pico de absorção de S ocorre aos 80-90 dias e as quantidades requeridas são de 32 kg ha<sup>-1</sup> de S.

O milho apresenta períodos diferentes de intensa absorção, com o primeiro ocorrendo durante a fase de desenvolvimento vegetativo (V12 a V18), quando o número potencial de grãos está sendo definido e o segundo, durante a fase reprodutiva ou formação da espiga, quando o potencial produtivo é atingido. Isso enfatiza que, para altas produções, mínimas condições de estresses devem ocorrer durante todos os estádios de desenvolvimento da planta (Karlen et al. 1987; Coelho et al. 2004).

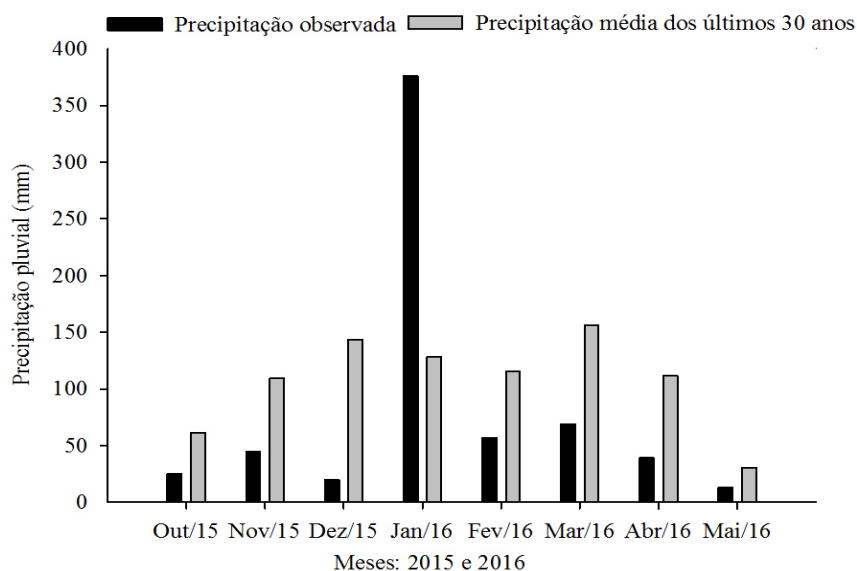
A extração de nutrientes depende da produtividade obtida e da acumulação de nutrientes nos grãos e em outras partes da planta. É necessário colocar à disposição da planta as quantidades de nutrientes extraídas, sendo que estas devem ser repostas pelo solo e pelas adubações. Após a definição das doses de nutrientes a aplicar na cultura, o passo seguinte é conhecer a absorção e a acumulação de nutrientes nas diferentes fases de desenvolvimento da planta (Von Pinho et al. 2009)

Desse modo, objetivou-se determinar a dinâmica da absorção e o teor de macronutrientes na folha, grãos de plantas de milho em função da disponibilidade dos nutrientes para a cultura do milho e os teores de nutrientes em profundidade no solo em função das diferentes doses e fontes de enxofre.

## **2. MATERIAL E MÉTODOS**

O trabalho foi desenvolvido na safra agrícola 2015/2016 em condições de campo, em área particular manejada no sistema de plantio convencional, localizada na Serra do Quilombo município de Bom Jesus (PI), Brasil (09°16'17'' S e 44°47'15'' O e 628 m de altitude), o clima é quente e semiúmido do tipo Aw (Köppen), com temperatura

variando de 18 a 36 °C. Na área predomina o solo do tipo Latossolo Amarelo distrófico (Santos et al. 2013). Dados da precipitação pluvial mensal na área durante a condução do experimento e a média histórica dos últimos 30 anos na região estão descritas na Figura 1 (BDMEP, 2016).



**Figura 1.** Precipitação pluvial observada durante a condução do experimento e precipitação pluvial média nos últimos 30 anos na área. Fonte: BDMEP (2016).

As características químicas (Tabela 1) do solo, nas camadas de 0 a 0,20 m e de 0,20 a 0,40 m, foram determinadas antes da condução do experimento, segundo método proposto por Raij et al. (2001). Quanto à granulometria, o solo apresentou 277, 672 e 51 g kg<sup>-1</sup> de argila, areia e silte, respectivamente, sendo classificado como textura média (Santos et al. 2013).

**Tabela 1.** Atributos químicos do solo antes do experimento nas camadas de 0–20 e 20–40 cm

Prof. (cm)	pH	P	S-SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	MO	Ca	Mg	Al	H+Al	K	CTC
	CaCl <sub>2</sub>	---mg dm <sup>-3</sup> ---		g dm <sup>-3</sup>	----- cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----					
0-20	4,60	2,1	6,4	13,7	1,6	0,5	0,06	0,6	0,063	2,7
20-40	4,05	0,4	17,0	7,8	0,6	0,3	0,18	0,3	0,012	1,3

A área foi desmatada no ano de 2012 e aplicada seis toneladas de calcário dolomítico por hectare e incorporado ao solo. Nos anos agrícolas 2012/2013 e 2013/2014 foram aplicados à lanço 110 kg ha<sup>-1</sup> de cloreto de potássio, já no ano agrícola 2014/2015 foram utilizados 230 kg ha<sup>-1</sup> de superfosfato triplo, tendo sido cultivado nos três anos cultura anual de soja.

Na safra 2015/2016 como parte deste trabalho foi semeada em 11 de janeiro de 2016 com milho variedade Híbrido Status Viptera 3, de ciclo precoce e utilizado na região. Antes do plantio foi adicionado a lanço 200 kg ha<sup>-1</sup> de cloreto de potássio e no

sulco do plantio 220 kg ha<sup>-1</sup> da fórmula 10-49-00. Quinze dias após a semeadura foi feito o desbaste manual, deixando 3 plantas por metro linear e foi utilizado em cobertura 280 kg ha<sup>-1</sup> de ureia.

O delineamento experimental utilizado foi blocos ao acaso, com 4 repetições. Os tratamentos foram dispostos em esquema fatorial com tratamento adicional, 3 x 4 + 1, foram três fertilizantes sulfatados: sulfurgran (90% de S), superfosfato simples (12% de S) e gesso agrícola (15% de S) e quatro doses de S: 15, 30, 45 e 60 kg ha<sup>-1</sup>, mais o tratamento adicional, (testemunha sem adubação com S), totalizando 52 unidades experimentais (Tabela 2). A dose total do fertilizante a ser utilizado em cada unidade foi distribuída a lanço 57 dias antes do plantio do milho e foi constituída por seis linhas de 5,0 m de comprimento e 2,5 m de largura, com 0,45 m de espaçamento entre linhas. A área útil de cada unidade experimental foi obtida eliminando-se as duas linhas laterais e 1 m de cada extremidade, abrangendo uma área útil de 5,4 m<sup>2</sup> por parcela.

**Tabela 2.** Tratamentos utilizados no local do ensaio.

Tratamentos	Dose nutriente (kg ha <sup>-1</sup> )	Fonte
1	00	Controle
2	15	Sulfurgran
3	30	Sulfurgran
4	45	Sulfurgran
5	60	Sulfurgran
6	15	SFS
7	30	SFS
8	45	SFS
9	60	SFS
10	15	Gesso
11	30	Gesso
12	45	Gesso
13	60	Gesso

Superfosfato Simples com 12% de S, Sulfurgran com 90% de S e Gesso com 15% de S.

As quantidades aplicadas de cada fonte do adubo foram calculadas com base no teor de S nos adubos. Os tratos culturais (controle de plantas daninhas, pragas, doenças) anterior e posteriores a semeadura seguiram o manejo adotado pela Fazenda conforme necessidades da cultura.

Para a análise química do solo foi coletada uma amostra composta em cinco pontos em cada parcela do experimento, para formar uma amostra composta de solo nas profundidades de 0-20 cm e 20-40 cm. As amostras foram encaminhadas para o Laboratório de Química Geral e Analítica da Universidade Federal do Piauí – Campus



Prof<sup>a</sup>. Cinobelina Elvas, onde foram secas e peneiradas em peneira de 2 mm. Amostras de terra fina e seca (TFSA) foram utilizadas para caracterização química (K, P, S, Ca, Mg, Al e matéria orgânica) conforme Miyazawa et al. (2009).

A amostragem das folhas foram realizadas, de acordo com as recomendações (Broch & Ranno, 2012), foi coletado o terço central da folha abaixo e oposta da espiga excluindo o pecúolo, em cada parcela do experimento. Após a amostragem foram lavadas e secas em estufa a 70 °C, trituradas e secas em estufa até obter o peso constante para a determinação de material seco. Os nutrientes foram extraídos do tecido vegetal pelo método da digestão úmida (Silva, 2009). Por meio da obtenção do extrato nítrico percólico foram determinados os teores de cálcio, magnésio e potássio por espectrofotometria de absorção atômica, o fósforo foi determinado por colorimetria e o enxofre por turbidimetria com sulfato de bário. Os teores de nitrogênio total foram determinados pelo método Kjeldahl (Boaretto et al. 2009).

Para a avaliação do estado nutricional os grãos foram coletados na área útil de cada parcela do experimento, em seguida foram moídos e secos em estufa a 70 °C até o peso constante e realizada a determinação dos macronutrientes, seguindo metodologia de (Boaretto et al. 2009).

Os dados foram submetidos à análise de variância, sendo as médias das fontes comparadas pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade. Os resultados das doses foram submetidos à análise de regressão polinomial, utilizando-se o programa estatístico Sisvar (Ferreira, 2000). Os modelos para ajuste das equações foram escolhidos com base no coeficiente de determinação e na significância.

### **3. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Os teores de  $\text{SO}_4^{2-}$  na camada de 0 a 20 cm do solo (Tabela,1), antes da implantação do experimento, estavam acima do nível de suficiência para as culturas menos exigentes, que é de  $5\text{mg dm}^{-3}$ , como o milho de acordo com a classificação realizada pela Comissão de Química e Fertilidade do Solo do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina é de  $10\text{ mg dm}^{-3}$  para as espécies das famílias das fabáceas, brassicáceas e liliáceas (CQFS-RS/SC, 2004). As irregularidades das condições pluviométricas na região (Figura 1), durante a condução do experimento podem ter influenciado na dinâmica e teor de macronutrientes no solo (Tabela 3) e na absorção de macronutrientes pelas plantas de milho.

Para a comparação das profundidades dentro de cada dose e fontes, somente o P remanescente apresentou diferença significativas entre si, na dose de  $15\text{ kg ha}^{-1}$  de

sulfurgran e nas doses 15 e 60 kg ha<sup>-1</sup> de gesso. As demais comparações entre fontes e doses dentro das duas profundidades, não apresentaram nenhuma significância.

**Tabela 3-** Atributos químicos do solo relacionados à disponibilidade de enxofre no solo na época do florescimento do milho em função de fontes e doses de enxofre na profundidade de 0-20 a 20-40 cm.

Fontes	Doses de S kg ha <sup>-1</sup>	Prof. cm	pH	S mg dm <sup>-3</sup>	P mg dm <sup>-3</sup>	Ca cmol c dm <sup>-3</sup>	Prem mg L <sup>-1</sup>	MO g dm <sup>-3</sup>	
Controle	0	0-20	5,9A	0,4A	29,4A	1,7A	46,5C	14,4A	
		20-40	4,8A	4,5B	22,0A	0,5,A	43,6C	6,7A	
sulfurgran	15	0-20	5,7aA	0,6aB	34,0aC	1,8aA	50,2aB	14,7aA	
		20-40	4,7bA	5,0bA	22,1bC	0,5bB	43,5aC	6,1bB	
	30	0-20	5,7aA	0,8aA	30,8aB	1,9aA	48,4aB	12,6aB	
		20-40	4,7bA	2,6bB	21,9bC	0,7bA	45,0bC	6,0bA	
sulfurgran	45	0-20	5,8aA	0,6aB	36,3aA	2,1aB	47,6aC	15,6aA	
		20-40	4,8bA	3,1bC	30,7bA	0,8bA	54,6bB	6,3bA	
	60	0-20	5,5aA	1,2aA	34,2aA	2,3aB	45,0aC	16,7aA	
		20-40	4,6bA	5,0bB	29,9bA	1,4bA	49,0bA	5,6bB	
Regressão		0-20	ns	*L	ns	*Q	**L	**Q	
		20-40	ns	*Q	**L	**L	**Q	ns	
SFS	15	0-20	5,7aA	0,5aB	46,2aA	1,6aA	46,5aC	13,8aA	
		20-40	4,9bA	4,7bA	28,1bA	0,7bA	46,9bB	5,6bB	
	30	0-20	5,6aA	0,8aA	43,4aA	1,5aB	50,5aB	13,7aB	
		20-40	4,7bA	5,4bA	27,6bA	0,6bA	45,4bC	6,9bA	
	45	0-20	5,6aA	1,2aA	34,5aA	2,0aB	46,2aC	14,3aB	
		20-40	4,7bA	5,6bA	27,3bB	0,7bA	43,7bC	6,7bA	
	60	0-20	5,5aA	1,4aA	37,4aA	2,1aB	42,9aC	17,3aA	
		20-40	4,6bA	6,3bA	28,0bB	0,4bB	45,9bB	6,0bB	
	Regressão		0-20	ns	**L	*L	ns	**Q	**Q
			20-40	ns	**L	ns	ns	**Q	**Q
Gesso	15	0-20	5,6aA	1,3aA	40,0aB	1,6aA	44,2aC	13,2aA	
		20-40	4,7bA	4,9bA	26,4bB	0,3bB	44,1aB	7,3bA	
	30	0-20	5,4aA	0,9aA	39,8aB	2,3aA	43,6aC	15,3aA	
		20-40	4,6bA	5,7bA	26,2bB	0,5bA	46,6bB	6,0bA	
	45	0-20	5,6aA	1,0aA	38,4aA	2,6aA	47,0aC	13,5aB	
		20-40	4,8bA	4,4bB	28,0bB	0,6bA	43,2bC	6,0bA	
	60	0-20	5,5aA	0,6aB	36,3aA	2,7aA	43,5aC	14,3aB	
		20-40	4,6bA	4,3bB	27,2bB	0,2bB	44,5aC	6,9bA	
	Regressão		0-20	ns	**L	*L	**L	ns	ns
			20-40	ns	*Q	*L	**Q	ns	**Q

Letras minúsculas comparam as profundidades dentro de cada dose e fonte e letras maiúsculas comparam as fontes dentro de cada dose na mesma profundidade. Letras iguais não diferem entre si pelo teste de Skott-Knott a 5% de probabilidade. <sup>(1)</sup> L e Q representam efeito linear e quadrático pela regressão polinomial, respectivamente. ns, \* e \*\*: não significativo e significativos a 5 e 1% pelo teste Skott-Knott, respectivamente.

Os adubos contendo enxofre não influenciaram no valor de pH em nenhuma das fontes e doses avaliadas, não tendo significância para as profundidades. Segundo Paiva & Nicodemo (1994) os principais fatores que influenciam o processo de mineralização de enxofre, em solos de região temperada, são a temperatura e o pH. O pH do solo é um

importante fator no controle da mineralização de enxofre, devido ao seu efeito marcante na população e na atividade de microrganismos.

O adubo sulfurgran aplicado no solo nas doses usadas apresentou diferença significativa a 5% para os valores de enxofre se adequando de forma linear para a camada de 0-20 cm, com a dose máxima de 60 kg ha<sup>-1</sup> e em equação quadrática para a camada de 20-40 cm, com valores máximos encontradas em 15 e 60 kg ha<sup>-1</sup>. Segundo Raij (1991) a aplicação de S-elementar ao solo deveria aumentar sua concentração; isto não aconteceu, possivelmente, pela lixiviação do sulfato, visto que os teores encontrados variaram de 0,95 a 1,2 mg dm<sup>-3</sup> de S.

Para o superfosfato simples e o gesso não foram encontradas diferenças estatísticas na análise de regressão. Melo & Ferreira (1983 e 2003) citaram que a elevação dos teores de S-sulfato resultante da aplicação de superfosfato simples em Latossolo Roxo perdurou apenas 106 dias, diminuindo em seguida, reforça a rapidez com que o íon sulfato é removido do perfil.

A dose de 15 kg ha<sup>-1</sup> de gesso apresenta a maior quantidade de S na camada de 0 a 20 cm, não apresentando diferença para maiores profundidades, isso pode acontecer devido à grande disponibilidade de S no solo antes da aplicação do adubo. No sulfurgran na dose 30 e 45 kg ha<sup>-1</sup> observaram-se menor quantidade de S na camada 0,20 e 20,40 cm entre as fontes e doses avaliadas, as plantas somente conseguem absorver o S elementar aplicado no solo depois de sua oxidação a sulfato, oxidação esta catalisada por enzimas produzidas principalmente por microrganismos (Horowitz & Meurer, 2006). O gesso agrícola é uma importante fonte de enxofre às culturas, esse adubo é prontamente disponível na forma de sulfato. Gesso na dose 60 kg ha<sup>-1</sup> apresentou menor quantidade de S na camada 0,20 e 20-40 cm.

Nogueira & Melo (2003) verificaram que os teores de S disponível (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) na camada de 0 a 20 cm do solo aumentaram com a aplicação de gesso, porém houve deslocamento desses S em profundidade no perfil, ficando pouco efeito residual nesta camada para os anos seguintes (Broch et al. 2011).

Para todas as fontes e doses a camada superficial concentrou poucas quantidades do enxofre aplicado, levando a identificar a lixiviação do nutriente para as camadas subsuperficiais do solo. De acordo com Alvarez (2004), a diminuição nos teores de S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> da camada superficial pode ser devido a vários fatores como, a utilização contínua de fertilizantes sem a reposição do enxofre exportado ou perdido por lixiviação e erosão, a incorporação na produção agrícola de novas áreas com solos contendo baixos

teores de argila, em consequência, baixos teores de óxidos de ferro e alumínio e matéria orgânica; a realização da calagem e da fertilização com fosfatos solúveis na camada superficial e sob sistema plantio direto que favorece o deslocamento do  $S-SO_4^{2-}$  adsorvido aos grupos funcionais à solução do solo.

A importância relativa de cada processo depende de fatores como temperatura do solo, pH, umidade, quantidade e tipos de argilominerais, óxidos de ferro e alumínio, conteúdos de carbono e N (Norman et al. 2002). Segundo Nogueira & Melo (2003) o teor de S no solo é influenciado pela precipitação pluvial, temperatura, adubação, manejo dos restos culturais e fertilizantes utilizados, condições estas que podem ter interferido nos resultados encontrados neste trabalho.

Solos argilosos com altos teores de óxidos de ferro apresentam grande capacidade de adsorção de  $SO_4^{2-}$ , o que diminui a sua movimentação no perfil do solo. Já em solos arenosos a movimentação de  $SO_4^{2-}$  é maior e, com isso, este pode ser perdido por percolação. Além disso, solos arenosos possuem baixos teores de matéria orgânica, conseqüentemente menores reservas de S orgânico (Stipp & Casarin 2010). Portanto, solos com maiores teores de argila armazenam maiores quantidades de S tanto na forma orgânica quanto inorgânica (Alvarez, 2004).

O fósforo apresentou comportamento ao nível de probabilidade linear a 1% utilizando a fonte sulfurgran na camada de 20-40 cm e a 5% para o gesso na mesma camada e na camada 0-20 cm. O superfosfato simples também apresentou significância a 1% na camada de 0-20 cm para o fósforo no solo.

A menor quantidade de P significativamente foi encontrada no solo quando se aplicou a dose de  $15 \text{ kg ha}^{-1}$  de sulfurgran em relação às demais fontes, sendo menores também na dose  $30 \text{ kg ha}^{-1}$  nas duas profundidades, sendo maiores valores nas doses de  $45 \text{ kg ha}^{-1}$  e  $60 \text{ kg ha}^{-1}$  na camada de 20-40 cm.

Os valores de cálcio não foram significativos para o superfosfato simples nas duas camadas de solos analisadas, porém o gesso se adequou significativamente a 1% de forma linear e quadrática nas camadas de 0-20 e 20-40 cm respectivamente, enquanto o sulfurgran também foi significativo a 1% em equação linear na camada de 20-40 cm a 5% de significância de forma quadrática na camada 0-20 cm do solo.

Além do gesso agrícola favorecer os atributos químicos do solo como fornecimento de cálcio, enxofre e redução da saturação por alumínio, esse condicionador do solo pode exercer influência nos atributos físicos do solo, como a densidade, porosidade total e resistência à penetração do solo (Raij, 2008).

O benefício da aplicação do gesso agrícola como condicionador de subsolo está bem definido, por suprir Cálcio e Enxofre em profundidade e principalmente por sua capacidade de mover o cátion  $Al^{3+}$  no solo. Por isso, o uso do gesso vem aumentando significativamente no Cerrado brasileiro, aonde o solo é pobre em macronutrientes secundários como  $Ca^{2+}$  e S, tendo problemas também com os níveis tóxicos de  $Al^+$  e deficiência de micronutrientes (Berro et al. 2015).

O superfosfato simples é um fertilizante de rápida solubilidade e com teor de 12% de  $S-SO_4^{2-}$  na sua composição, disponibilizando facilmente para as culturas, já outras fontes, como o S elementar, precisa sofrer algumas reações de oxidação no solo para ficarem disponíveis, sendo transformados em  $SO_4^{2-}$  (Broch et al, 2011).

O superfosfato simples é um produto de alta solubilidade em água e alta eficiência agrônômica, a grande vantagem do superfosfato simples é a presença de Ca e S na forma de sulfato de cálcio (gesso), o que possibilita, ao longo do tempo, a melhoria das condições subsuperficiais do solo. Isso por que contribui para a redução do alumínio (Al) tóxico e proporciona condições favoráveis para o enraizamento das plantas. Práticas de calagem e utilização de superfosfato simples como fonte de P e S tem sido considerada uma excelente forma de adubação para diversas culturas (Oliveira, 2007).

O gesso na dose  $15\text{ kg ha}^{-1}$  apresentou maior valor de cálcio na camada de 20-40 cm com relação as demais fontes na mesma profundidade. A dose  $30\text{ kg ha}^{-1}$  de gesso e no sulfurgan apresentaram maior quantidade de cálcio na camada 0-20 cm. Na dose de 45 e  $60\text{ kg ha}^{-1}$  o gesso apresentou significância para o cálcio na camada de 0-20 cm. E na camada 20-40 o cálcio foi significativamente maior na dose  $60\text{ kg/ha}^{-1}$  de sulfurgan.

Efeitos significativos a 1% foram encontrados nas fontes de sulfurgan e superfosfato simples para o P remanescente nas camadas avaliadas, se adequando de forma linear para o sulfurgan na camada 0-20 cm e em equação quadrática para as demais fontes nas camadas. O Gesso não representou nenhuma significância para P remanescente nas duas camadas.

O P remanescente na dose  $15\text{ kg ha}^{-1}$  de sulfurgan foi significativamente maior na profundidade 0-20 cm do solo e menor na profundidade 20-40 cm, indicando pouca mobilidade no perfil do solo. Na dose  $30\text{ kg ha}^{-1}$  o P remanescente foi menor onde se aplicou a fonte de gesso e maior na camada 0-20 cm em relação às outras fontes. Na camada de 20-40 cm usando as doses 45 e  $60\text{ kg ha}^{-1}$  de sulfurgan foram encontrados os maiores valores para P remanescente, sendo significativamente diferente nas demais fontes.

Os adubos e suas respectivas doses representaram efeito significativo de forma quadrática a 1% para a matéria orgânica do solo, exceto a não significância encontrada para o sulfúrico e o gesso na camada 0-20 e 20-40 cm respectivamente.

Para a relação do adubo com os valores de matéria orgânica do solo, a camada de 0-20 cm na dose 30 kg ha<sup>-1</sup> de sulfúrico apresentou o menor valor nessa profundidade, para o superfosfato simples a dose 60 kg ha<sup>-1</sup> apresentou maior valor em comparação com outras doses e fontes. Na adubação com gesso a dose 30 kg ha<sup>-1</sup> na camada 0-20 cm também apresentou maior valor de matéria orgânica do solo. Na profundidade de 20-40 cm a dose 60 kg ha<sup>-1</sup> de sulfúrico apresentou menor valor de matéria orgânica e o superfosfato simples encontrou-se menor valor para as doses 15 e 60 kg ha<sup>-1</sup> e com o uso do gesso a dose 15 kg ha<sup>-1</sup> se destacou por apresentar maior valor de matéria orgânica no solo na camada 20-40 cm do solo. O sistema convencional o manejo e preparo do solo na fazenda, o qual provoca drástica redução nos teores de matéria orgânica e, conseqüentemente, na quantidade de S desses solos, provocada tanto pela mineralização quanto pela erosão (Rheinheimer et al. 2007).

No entanto, ainda há dúvidas sobre as condições em que se podem esperar efeitos favoráveis do gesso nas produções das culturas e sobre o método de recomendação do produto (Berro et al. 2015). E em trabalho de condições de campo o gesso proporcionou maiores resultados para as características de fertilidade do solo.

A análise foliar (Tabela 4) pode fornecer informações complementares à aquelas geradas pela análise do solo e auxiliar na solução de algum problema nutricional, assim como auxiliar no planejamento da adubação (Broch & Ranno, 2012). A partir desses dados é possível planejar adubações mais eficientes, fornecendo nutrientes na quantidade correta, evitando gastos desnecessários e perdas no sistema, diminuindo o risco de contaminação ambiental (Coelho & França, 1995).

A utilização da análise foliar como critério diagnóstico baseia-se na premissa de existir uma relação significativa entre o suprimento de nutrientes e os níveis dos elementos, e que aumentos ou decréscimos nas concentrações se relacionam com produções mais altas ou mais baixas, respectivamente. (Coelho & França, 1995).

As plantas de milho absorveram S foliar em maior quantidade foi nos tratamentos onde foi aplicado o sulfúrico, superfosfato simples e gesso respectivamente. As doses nos três adubos apresentaram diferenças entre o teor de S e as fontes superfosfato simples e gesso obtiveram efeito linear a 1%.

De acordo com Lara Cabezas & Souza (2008) analisando o teor de S-foliar no milho que geralmente se mostra deficiente em solos do Cerrado e do Brasil, encontrou o S-total na planta foi semelhante em todos os tratamentos, variando entre 28,1 e 34,2 kg ha<sup>-1</sup>. A análise do tecido das plantas é outra ferramenta útil na predição da disponibilidade de enxofre na planta para que se obtenha uma boa produtividade (Zhao et al. 1996; Ensminger & Freney, 1966).

**Tabela 4-** Teores de macronutrientes nas folhas do milho na época do florescimento em função de fontes e doses de enxofre.

Fontes	Doses de S kg ha <sup>-1</sup>	N	P	K	Ca	Mg	S
		g kg <sup>-1</sup>					
Controle	0	18,9	2,0	11,9	6,1	2,4	1,8
	15	17,4b	2,4a	12,1a	2,5c	2,2a	1,7a
	30	18,2b	1,9a	10,7b	6,3b	2,8a	1,8a
	45	18,9a	2,5a	10,6b	3,8c	2,2a	1,9a
	60	17,0a	1,2b	11,8a	2,2c	2,8a	1,7a
		**Q	*L	**Q	**Q	ns	ns
sulfurgran	15	18,9a	2,6a	11,2a	5,9a	1,7b	1,8a
	30	19,3a	2,3a	12,3a	7,0a	1,9b	1,8a
	45	11,2c	1,3b	11,0b	8,7a	1,8b	1,2b
	60	11,2c	1,4b	10,6a	6,4a	1,7b	1,1b
	Regressão		**L	**L	**Q	**Q	ns
Gesso	15	7,2c	1,6b	11,3a	4,6b	1,4b	0,7b
	30	11,5c	2,4a	9,9b	6,3b	2,1b	1,1b
	45	13,5b	2,0a	12,2a	6,5b	1,9b	1,3b
	60	13,0b	2,7a	10,9a	4,7b	2,0b	1,5a
	Regressão		**Q	*L	ns	**Q	ns

Letras comparam as fontes dentro de cada dose. Letras iguais entre as fontes dentro de cada dose não diferem entre si pelo teste de Skott-Knott a 5% de probabilidade. <sup>(1)</sup> L e Q representam efeito linear e quadrático pela regressão polinomial, respectivamente. ns, \* e \*\*: não significativo e significativos a 5 e 1% pelo teste Skott-Knott, respectivamente.

O acúmulo de enxofre na planta de milho segue padrão similar ao do N. Entretanto, as quantidades de S acumulado nos estádios iniciais e suas quantidades totais são inferiores às de N. A quantidade máxima de S acumulado ocorre entre 80 e 90 dias, a partir de quando há uma queda acentuada no acúmulo de S na planta (Andrade et al. 1975; Gallo et al. 1968; Borges, 2006). Assim como encontrado neste trabalho o acúmulo de N e S seguiu um padrão de absorção em diferentes quantidades, mas na mesma proporção, se verificando uma relação de acompanhamento dos valores para os dois nutrientes em doses e fontes.

No solo, o enxofre (S) é encontrado predominantemente na forma orgânica. Assim, a capacidade do solo em suprir a demanda da planta pelo nutriente está estreitamente relacionada ao teor de matéria orgânica e sua mineralização, que,

gradualmente, disponibilizará o S na forma de sulfato para a solução do solo, o qual poderá ser absorvido pelas plantas (Tiecher et al. 2012).

Em condições aeróbicas, o ânion  $\text{SO}_4^{2-}$  é a forma mineral de S predominantemente encontrada no solo e também a principal forma do elemento absorvido pelas plantas (Stipp & Casarin, 2010).

Os teores foliar de N nas três fontes apresentou diferença significativa, para as doses, com um maior teor na fonte sulfurgran, superfosfato simples e gesso, respectivamente, se adequando a função quadrática a 1% de probabilidade.

O aumento no teor de N no tecido das plantas é dependente do fornecimento de S e o aumento da produtividade do milho está diretamente ligado ao correto suprimento de N e S para a formação de aminoácidos e proteínas essenciais a planta. (Stipp & Casarin, 2010).

Os teores de Ca apresentaram as maiores amplitudes de absorção com valores entre  $2,2 \text{ g kg}^{-1}$  na dose  $15 \text{ kg ha}^{-1}$  de sulfurgran e  $8,7 \text{ kg ha}^{-1}$  na dose  $45 \text{ kg ha}^{-1}$  de superfosfato simples, encontrando diferença estatística e se adequando em efeito quadrático a 1% de significância.

O teor foliar de Mg foi maior onde adubou com sulfurgran, encontrando significância na comparação de cada dose em comparação com doses dos outros adubos, e não mostrou diferença significativa pela regressão entre as doses nos tratamentos.

A fonte de gesso apresentou o menor teor foliar de macronutrientes em quase todas as doses avaliadas, situação também constatada para avaliação dos teores de grãos (Figura 5). Caires et al. (2004) não observaram diferença no teor foliar de nutrientes no milho em tratamentos com doses crescentes de gesso em SPD num Argiloso do Paraná. Para tratamentos com aplicação de zero até  $9 \text{ t ha}^{-1}$  de gesso, esses autores observaram valores médios de 33,4; 3,4; 27,4 e  $1,9 \text{ g kg}^{-1}$  de N, P, K e S, respectivamente.

O fósforo foliar representou efeito linear para as doses nas fontes, apresentando diferença estatística nas doses de  $45 \text{ e } 60 \text{ kg ha}^{-1}$  para as fontes, com menores valores encontrados de absorção para as doses de  $45 \text{ e } 60 \text{ kg ha}^{-1}$  de superfosfato simples e  $60 \text{ kg ha}^{-1}$  para o sulfurgran e  $15 \text{ kg ha}^{-1}$  na fonte gesso.

De acordo com Fundação MS, (2010), a concentração foliar adequada no milho é: N = 30,0-35,0; P = 3,0-3,7; K = 20,0-25,0; Ca = 5,0-8,0; Mg = 2,0-2,5 e S = 1,8-2,2 g/kg. Sendo que nesse trabalho os teores não estão dentro dos padrões adequados, isso pode estar ligado as irregularidades nas condições climáticas e baixas produtividades de



milho na região de cerrados do estado do Piauí no ano de execução do trabalho. De acordo com Borges (2006) a marcha de absorção de nutrientes na cultura do milho pode ser afetada pelo clima, pelas cultivares e pelo sistema de cultivo.

Solos com elevada disponibilidade de nutriente permitem que a planta absorva quantidades superiores as suas necessidades, caracterizando um consumo de luxo (Alvarez, 2004). Nestes casos, parte do S não metabolizado é armazenada na forma de  $\text{SO}_4^{2-}$  geralmente no vacúolo celular (Osório Filho, 2006).

Após o florescimento, as folhas da planta de milho não mais acumulam matéria seca e ainda sofrem redução desta, devido a intensa mobilização de fotoassimilados para as partes reprodutivas, lixiviação de potássio, senescência, queda de folhas, principalmente as baixas (Sayre, 1948; Vasconcelos et al. 1983; Borges, 2006). Situação que pode ser afetada pelos baixos teores de macronutrientes foliar encontrados, pois a coleta da folha do milho foi realizada em pleno florescimento da cultura, fase onde os nutrientes são translocados da folha para outras partes e as perdas por despencamento.

Com relação à exportação para os grãos, o fósforo e o nitrogênio são translocados para os grãos quase que na sua totalidade, seguindo-se o magnésio, o potássio e o cálcio (Bull, 1993; Borges, 2006)

Há uma estreita relação entre o teor foliar de enxofre e a produção relativa de grãos na cultura do milho. Resposta do milho a aplicação de enxofre foram obtidas também na produção de matéria seca (Freire et al. 1972; Soares et al. 1983; Kliemann, 1987, citado por Vitti, 1989; Borges, 2006).

Os totais de macronutrientes acumulados pela cultura do milho neste experimento foram menor aos observados em outros trabalhos, isso pode ser explicado pelas condições pluviométricas irregulares durante o desenvolvimento da cultura e a baixa produtividade encontrada na cultura.

Os teores de nutrientes nos grãos encontrados nas plantas onde foi aplicado o gesso e superfosfato simples o S foi translocado para os grãos em quantidades semelhantes, esses adubos favorecem a absorção imediata do S. Segundo Coelho, et al., (2008), as necessidades de enxofre para o milho são geralmente supridas via fornecimento de fertilizantes carregados de macronutrientes primários e também portadores de enxofre, dentre eles o superfosfato simples (12 % de enxofre) e o gesso agrícola (15 a 18 % de enxofre) são as fontes mais comuns desse nutriente. (Tabela 5).

**Tabela 5-** Teores de macronutrientes nos grãos do milho extraído pela cultura destinado à produção de grãos.

Fontes	Doses de S	N	P	K	Ca	Mg	S
	kg ha <sup>-1</sup>						
Controle	0	23,9	3,6	26,4	3,6	3,2	0,6
	15	23,5c	4,5a	20,5a	3,0a	3,5a	0,8b
	30	23,1c	4,0a	25,1a	2,8a	3,6a	0,8b
	45	23,1c	3,9a	20,3a	3,0a	3,3a	0,9b
	60	24,6c	5,9a	18,8a	3,0a	3,1a	1,6a
	Regressão	ns	**Q	**Q	ns	ns	**Q
SFS	15	28,5a	3,4b	16,4c	2,7b	2,9b	1,5a
	30	28,8b	2,9b	25,2a	2,7a	3,2b	1,5a
	45	23,8c	3,6a	18,3b	2,7a	3,0b	1,5a
	60	23,6c	3,3b	14,5b	2,8a	3,0b	1,4a
		Regressão	**L	ns	**Q	ns	ns
Gesso	15	26,0b	3,6b	18,9b	2,4c	1,6c	1,4a
	30	23,2c	2,3b	18,3b	2,4b	1,9c	1,5a
	45	23,2c	2,0b	14,3c	2,3b	2,1c	1,5a
	60	25,3c	2,6c	6,4c	2,5b	2,2c	1,3a
		Regressão	**Q	**Q	**Q	ns	ns

Letras comparam as fontes dentro de cada dose. Letras iguais entre as fontes dentro de cada dose não diferem entre si pelo teste de Skott-Knott a 5% de probabilidade. <sup>(1)</sup> L e Q representam efeito linear e quadrático pela regressão polinomial, respectivamente. ns, \* e \*\*: não significativo e significativos a 5 e 1% pelo teste Skott-Knott, respectivamente.

Os grãos das parcelas que receberam o adubo sulfurgran o teor de enxofre e nitrogênio translocado para os grãos foi em menor quantidade, pois de acordo com (Cantarella et al. 2007), pois esse é um adubo com o S elementar não prontamente disponível, e sua utilização pelas plantas depende de sua oxidação a sulfato, realizada principalmente por microorganismos do solo, podendo estar indisponível para a cultura.

Segundo Alvarez (2004), o teor e o acúmulo de S no grão da cultura do milho não se diferenciaram estatisticamente entre os tratamentos. O teor de S no grão variou de 0,14% a 0,16%, sendo similares aos citados por Mengel & Kirkby (1987) como sendo ideal para o milho.

O cálcio foi bem absorvido pelos grãos de milho na aplicação dos adubos, seguindo a ordem de quantidade com diferenças em relação à absorção encontrada pelas folhas, sulfurgran, superfosfato e gesso, respectivamente, não se obtendo significância em nenhuma das equações na regressão. No entanto a comparação das fontes em cada dose apresentou diferença estatística a 5% de probabilidade.

O magnésio é menos translocado para os grãos de milho, quando foi aplicado o gesso e maiores teores foram encontrados pela fonte sulfurgram, porém não apresentou efeito linear ou quadrático, no entanto a comparação das fontes em cada dose apresentou diferenças estatísticas, com menores teores para as doses de gesso.

Para os teores de P no grão observaram-se uma maior absorção onde se aplicou o sulfurgran, com doses se diferenciando das outras doses nas fontes aplicadas, variando de 2,3 e 5,9 g/kg no gesso e sulfurgran, respectivamente.

Na cultura do milho, os nutrientes têm diferentes taxas de translocação entre os tecidos, no que se refere à exportação dos nutrientes, o fósforo é quase todo translocado para os grãos (77% a 86%), seguido pelo nitrogênio (70% a 77%), pelo enxofre (60%), pelo magnésio (47% a 69%), pelo potássio (26% a 43%) e pelo cálcio (3% a 7%) (Coelho & Resende, 2008).

A translocação de K no grão de milho com a aplicação de gesso decresceu os valores de forma quadrática entre as maiores doses utilizada, correlacionado negativamente. As maiores doses dos adubos apresentaram menor absorção de K para os grãos em todos os adubos avaliados. Encontrando uma variação dos valores entre 6,4 e 25,1 g kg<sup>-1</sup> entre a dose 60 kg ha<sup>-1</sup> de gesso e 30 kg ha<sup>-1</sup> na aplicação de sulfurgran respectivamente, sendo a maior dose para o tratamento controle, podendo ser um efeito de diluição em razão da produtividade.

As doses do sulfurgran não foram encontradas diferença para o teor de N nos grãos, para o superfosfato simples as dose de 15 e 30 kg ha<sup>-1</sup> acumularam maior quantidade de N para os grãos 28,5 e 28,8 g kg<sup>-1</sup>, respectivamente, e no gesso se observou maior valor para a dose 15 kg ha<sup>-1</sup>. Se comparando o efeito de significância entre as dose, apenas as dose de 15 kg ha<sup>-1</sup> se diferiram entre si nas fontes.

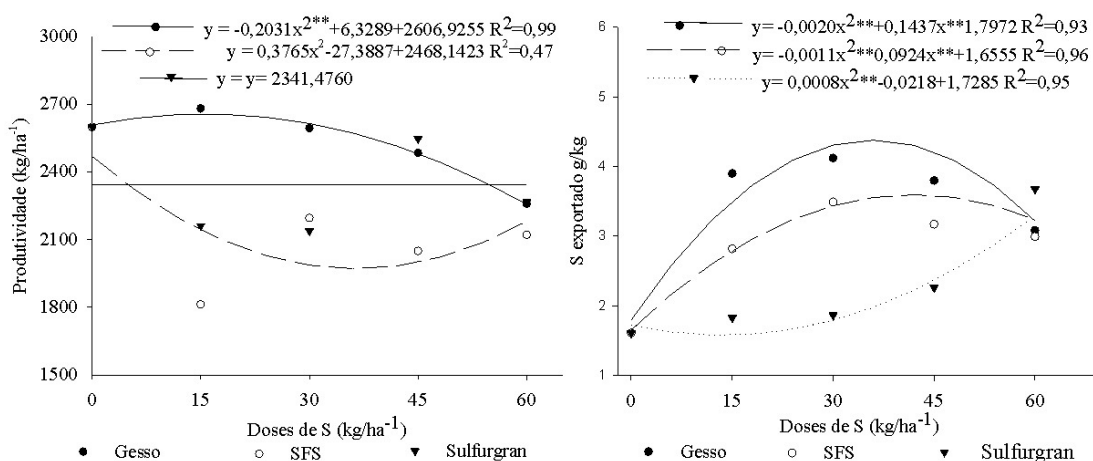
Neste trabalho realizado em Latossolos do Cerrado em condições de baixas produtividades e estresse hídrico os macronutrientes acumulados em maior quantidade nos grãos do milho foram o N, K, P, Mg Ca e S. De maneira geral a maior absorção de macronutriente se deu com a utilização do adubo sulfurgran. Exceto para N e S que foram menos absorvidos com esse nutriente, podendo o S nesse adubo não estar disponível para a cultura e terem um padrão acúmulo de enxofre na planta de milho similar ao do nitrogênio.

Neste trabalho (Figura 2) uma produtividade de 2,50 t/ha<sup>-1</sup>, extrai 2,6 g kg<sup>-1</sup> de N, 3,6 g kg<sup>-1</sup> de P, 18,9 g kg<sup>-1</sup> de K, 2,4 g kg<sup>-1</sup> de Ca, 1,6 g kg<sup>-1</sup> de Mg e 1,4 g kg<sup>-1</sup> de S, valores encontrados em referencias foram maiores, isso pode ser ocasionado pelas condições de irregularidade climáticas, de baixas produtividades na safra e a dinâmica de desenvolvimento da cultura, sob condições adversas encontradas.

As necessidades nutricionais das plantas correlacionam-se diretamente com a extração total de nutrientes, que por sua vez, correlaciona-se com o rendimento obtido e

com a concentração de nutrientes nos grãos e na palhada. Desse modo, deve-se disponibilizar às plantas, a quantidade de nutrientes satisfatória, para atender à demanda, à extração total de nutrientes, adicionando ao solo os nutrientes requeridos, por meio de adubações, independentemente dos sistema de produção, seja produção de grãos, ou de silagem (Malavolta, 2006).

**Figura 2-** Produtividade e quantidade de S exportada nos grãos de milho em função de fontes e doses de S aplicadas no solo.



Assim como na produtividade o S exportado foi maior na adubação com gesso, atingindo maiores valores nas doses de 15 e 30 kg/ha<sup>-1</sup>, se adequando a equação quadrática. De acordo com Borges (2006) as necessidades nutricionais da planta são determinadas pela quantidade de nutrientes que ela extrai durante o seu ciclo. A quantidade de nutrientes extraídos dependerá da produtividade obtida e da acumulação de nutrientes nos grãos e em outras partes da planta.

Foi observado um comportamento quadrático no S exportado, com um aumento da dose 0 kg/ha<sup>-1</sup> a dose 60 kg ha<sup>-1</sup> de S quando se utiliza o sulfúrguan, evidenciando uma correlação positiva entre dose e S-exportado, quanto maior a dose de S maior a exportação de S para as fontes. Na produtividade não se obteve nenhuma diferença significância entre as doses avaliadas, evidenciando o efeito no teor de S e não efeito na produtividade, e ainda, mostrando complexidade entre a absorção, produtividade e exportação.

O gesso apresentou maior produtividade de milho na dose de 15 kg ha<sup>-1</sup> entre as fontes e doses avaliadas e também o maior valor de exportação de enxofre, com o maior valor encontrado entre as doses 30 e 45 kg ha<sup>-1</sup> e seguidas pela fonte de superfosfato simples que apresentaram menores valores de exportação de S, no entanto as doses de maior valor foi também entre 30 e 45 kg ha<sup>-1</sup>.

A dinâmica do enxofre no solo envolve reações de oxi-redução, mineralização e imobilização, e adsorção de sulfato(s) nos colóides do solo. A complexidade destas transformações torna difícil a avaliação da disponibilidade de S para as plantas (Paiva & Nicodemo, 1994)

O superfosfato simples oscilou na produtividade de milho em relação às doses, sem nenhuma significância e na exportação de S, foi observado um comportamento quadrático com a maior produtividade no controle, seguido da dose 30 kg/ha<sup>-1</sup>.

Richart et al. (2006), verificou-se efeito negativo para as doses de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e efeito positivo para as doses de S, para ambas as fontes, no teor foliar de S. No entanto, a interação positiva para as doses de S caracteriza-se pela necessidade de S, conforme se aumentam as doses de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.

A nutrição mineral adequada da cultura do milho é uma das formas de aumentar a produtividade, principalmente por afetar a área foliar produzida nos primeiros estádios de crescimento e o tempo em que as folhas permanecem vivas e funcionando durante a formação dos grãos (Hanway, 1962; Borges, 2006).

Os teores e a exportação de enxofre pelos grãos de milho não diferiram estatisticamente entre os tratamentos. Os teores de enxofre nos grãos variaram de 1,2 a 1,7g kg<sup>-1</sup>. As quantidades de enxofre exportado pelos grãos variaram de 11,5 a 17,5 kg ha<sup>-1</sup> (Rhein, 2005).

O acúmulo de enxofre na planta de milho segue um padrão similar ao do N. Entretanto, as quantidades de S acumulado nos estádios iniciais e suas quantidades totais são inferiores às de N. A quantidade máxima de S acumulado ocorre entre 80 e 90 dias, a partir de quando há uma queda acentuada no acúmulo de S na planta (Andrade et al. 1975; Gallo et al. 1968). Stewart & Porter (1969) obtiveram máximas produções de matéria seca em plantas jovens de milho quando a relação N/S no tecido se apresenta em torno de 11.

Quanto a correlação dos adubos e os parâmetros avaliados, houve correlação positiva para o S-solo 0-20 cm com o S-grão e com o S-exportado, onde foi utilizado o adubo sulfurgran, já o superfosfato simples correlacionou o S-solo 0-20 cm com o S-solo 20-40 cm e o S-exportado obteve correlação com o solo 20-40 cm e com o S-grão, para o gesso observou-se uma correlação do S-grão com o S-solo 0-20 cm e na folha.

Nas correlações negativas o sulfurgran não houve nenhuma significância nesta avaliação, e o superfosfato simples correlacionou o S-folha com o S-solo nas camadas

0-20 e 20-40 cm e a produtividade se correlacionou com o S-grão. O Gesso correlacionou o S-solo 0-20 cm com o S-folha e este com o S-exportado.

**Tabela 6-** Correlação de Pearson entre a disponibilidade de S no solo, o teor de S nas folhas e nos grãos, produtividade e quantidade de S exportado pelo milho.

Sulfurgran						
	S-solo 0-20	S-solo 20-40	S-folha	S-grão	Prod	S-exp
S-solo 0-20 cm	1	0,160 <sup>ns</sup>	-0,185 <sup>ns</sup>	0,592**	-0,330 <sup>ns</sup>	0,537**
S-solo 20-40 cm		1	-0,189 <sup>ns</sup>	0,202 <sup>ns</sup>	-0,0118 <sup>ns</sup>	0,229 <sup>ns</sup>
S-folha			1	0,132 <sup>ns</sup>	0,268 <sup>ns</sup>	0,243 <sup>ns</sup>
S-grão				1	-0,416 <sup>ns</sup>	0,963 <sup>ns</sup>
Prod					1	-0,176 <sup>ns</sup>
S-exp						1
Superfosfato simples						
S-solo 0-20 cm	1	0,595**	-0,445*	0,285 <sup>ns</sup>	-0,212 <sup>ns</sup>	0,298 <sup>ns</sup>
S-solo 20-40 cm		1	-0,460*	0,361 <sup>ns</sup>	-0,135 <sup>ns</sup>	0,445*
S-folha			1	-0,0361 <sup>ns</sup>	0,252 <sup>ns</sup>	0,0415 <sup>ns</sup>
S-grão				1	-0,666**	0,911**
Prod					1	-0,313 <sup>ns</sup>
S-exp						1
Gesso						
S-solo 0-20 cm	1	0,230 <sup>ns</sup>	-0,707**	0,456*	-0,00405 <sup>ns</sup>	0,465*
S-solo 20-40 cm		1	-0,367 <sup>ns</sup>	0,309 <sup>ns</sup>	0,221 <sup>ns</sup>	0,375 <sup>ns</sup>
S-folha			1	0,517*	-0,226 <sup>ns</sup>	-0,600**
S-grão				1	-0,415 <sup>ns</sup>	0,962 <sup>ns</sup>
Prod					1	0,123 <sup>ns</sup>
S-exp						1

<sup>ns</sup>, \* e \*\*: não significativo e significativos a 5 e 1% pela Correlação de Pearson, negativo ou positivo, respectivamente.

#### 4. CONCLUSÕES

Os adubos contendo enxofre não influenciaram no valor de pH em nenhuma das fontes e doses avaliados, não sendo significativos para as profundidades.

O enxofre na forma de sulfato é removido para o perfil do solo, o sulfurgran disponibilizou pouca quantidade de sulfato em comparação com outras fontes.

O acúmulo de sulfato na cultura do milho segue um padrão similar ao do N, entretanto as quantidades de enxofre acumulado totais são inferiores.

O maior teor de macronutrientes no grão se deu com a utilização do adubo sulfurgran.

As quantidades de S-exportado apresentaram efeito significativo atingindo maiores valores entre as maiores doses, seguindo os padrões adequando a produtividade no adubo gesso.

O S do solo na profundidade 0-20 cm apresentou correlação positiva para o enxofre no grão e no enxofre exportado.

#### 5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVAREZ, J. W. R. Disponibilidade e resposta de culturas ao enxofre em solos do Rio Grande do Sul. PPGCS – Dissertação de Mestrado. UFSM. Santa Maria, RS, Brasil. 2004. ALVAREZ, J. W R. Disponibilidade e resposta de culturas ao enxofre em solos do Rio Grande do Sul. 2004. 84 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo). Universidade Federal de Santa Maria, 2004.

ANDRADE, A. G. D. HAAG, H. P. OLIVEIRA, G. D. DE e SARRUGE, J. R. Acumulação diferencial de nutrientes em cinco cultivares de milho (*Zea mays*). Crescimento. Anais da Escola Superior de Agricultura Luis de Queiroz, Piracicaba, v. 32, p. 115-149, 1975.

BARBOSA FILHO, M. P. Nutrição e adubação do arroz (sequeiro e irrigado). Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 120 p. (Boletim Técnico, 9). 1987.

BDMEP - Banco de Dados Meteorológico para o Ensino e Pesquisa. Série histórica. Dados mensais. Bom Jesus (PI). [2016]. Brasília: Instituto Nacional de Meteorologia, [2016]. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>>. Acesso em: out. 2016.

BERRO, M. D. S. (PIBIC/CNPQ), MINATEL, L. F., GARCIA, E. A. S. MARONEZI, G. L. CONTE A. M. Lixiviação de macronutrientes catiônicos em solo tratado com calagem e gesso agrícola e o desenvolvimento da cultura do milho (*Zea mays* L.). Universidade Estadual do Norte do Paraná/Campus Luiz Meneghel. Jornada de Iniciação científica da UENP. DESCOBRINDO A CIENCIA, 2015.

BOARETTO, A. E. VAN RAIJ, B. SILVA, F. C. CHITOLINA, J. C. TEDESCO, M. J. CARMO, C. A. F. S. Amostragem, acondicionamento e preparo de amostras de plantas para análise química. In: SILVA, F. C. D. Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. 2. ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, p. 59-85. 2009.

BORGES, I. D. Marcha de absorção de nutrientes e acúmulo de matéria em cultivares de milho / Iran Dias Borges. - Lavras: UFLA, 2006.

BROCH, D. L. PAVINATO, P. S. JEAN, C. P. THOMAS, N. M. ERCI, M. DEL Q. Produtividade da soja no cerrado influenciada pelas fontes de enxofre. Revista Ciência Agronômica, v. 42, n. 3, p. 791-796, jul - set, 2011.

BROCH, D. L. RANNO, S. K. Fertilidade do Solo, Adubação e Nutrição da Cultura do Milho. Fundação MS. Tecnologia e Produção: Soja e Milho, 2012.

BULL, L. T. CANTARELLA, H. Cultura do milho: Fatores que afetam a produtividade. Piracicaba: Potafós, 301p. 1993.

BULL, L. T. Nutrição mineral do milho. In: BULL, L. T. CANTARELLA, H. (Ed.) Cultura do milho: fatores que afetam a produtividade. Piracicaba: POTAFOS, 1993. p. 63-145.

CAIRES, E. F. KUSMAN, M. T. BARTH, G. GARBUIO, F. J. PADILHA, J. M. Alterações químicas do solo e resposta do milho à calagem e aplicação de gesso. Revista Brasileira de Ciência do Solo. 125-136, 2004.

CANTARELLA, H. Nitrogênio. In: NOVAIS, R. F. ALVAREZ, V. V. H. CANTARUTTI, R. B. NEVES, J. C. L. (Ed.). Fertilidade do Solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 375-470.

CLARKSON, D. T. SMITH, F. W. BERG, P. J. Regulation of sulfate transport in a tropical legume, *Macroptilium atropurpureum*, cv. Siratro. Journal of Experimental Botany, Oxford, v. 34, p. 1463-1483, 1983.

COELHO, A. M. CRUZ, J. C. PEREIRA FILHO, I. A. Desafios para obtenção de altas produtividades de milho. Palestra a ser apresentada no XXV Congresso Nacional de Milho e Sorgo a ser realizado em Cuiabá, MT, no período de 29 de Agosto a 02 de Setembro de 2004. Embrapa Milho e Sorgo, CP 151, Sete Lagoas, MG. 2004.

COELHO, A. M. e RESENDE, A. V. D. Exigências Nutricionais e Adubação do Milho Safrinha, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Circular Técnico. Embrapa Milho e Sorgo. Sete Lagoas, MG, Dezembro, 2008.

COELHO, A. M. FRANÇA, G. E. DE EXEL PITTA, G. V. ALVES, V. M. C. HERNAN, L. C. Embrapa Milho e Sorgo. Sistemas de Produção. Fertilidade de solos ISSN 1679-012X Versão Eletrônica - 4ª edição Set./2008.

COELHO, A. M. FRANÇA, G. E. Seja doutor do seu milho. Nutrição e Adubação. Arquivo do Agrônomo – Nº 2 Potafotos – Caixa Postal 400 CEP 134000-970 Piracicaba – SP. Setembro, 1995.



CQFS RS/SC – Comissão de Química e Fertilidade do Solo. Manual de adubação e calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. 10. Ed. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo – Núcleo Regional Sul, 400p. 2004.

ELSMINGER, L. E. FRENEY, J. R. Diagnostic techniques for determining sulfur deficiencies in crops and soils. *Soil Science*, Baltimore, v.101, p. 283-290, 1966.

FERREIRA, D. F. Análises estatísticas por meio do SISVAR (Sistema para Análise de Variância) par Windows 4. 0. UFSCar, 2000.

FIORINI, I. V. A. Resposta da cultura do milho a diferentes fontes de enxofre e formas de aplicação de micronutrientes / Ivan Vilela Andrade Fiorini. – Lavras: UFLA, 2011. 70 p. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Lavras, 2011.

FREIRE, J. C. LOPES, A. S. AQUINO, L. H. CAMARGO, J. G. Influência do enxofre na produção de matéria seca do milho. *Agros*, Lavras, v. 1, n. 2, p. 35-46, 1972.

FUNDAÇÃO MS, 2010. In. BROCH, D. L. RANNO, S. K. Fertilidade do Solo, Adubação e Nutrição da Cultura do Milho. Tecnologia e Produção: Soja e Milho 2011/2012.

GALLO, J. R. HIROCE, R. DE MIRANDA, L. T. A análise foliar na nutrição do milho. I. Correlação entre análise das folhas e produção. *Bragantia*, Campinas, v. 27, n. 15, p. 177-186, abr. 1968.

HANWAY, J. J. Corn growth and composition in relation to soil fertility: I. Growth of different plant parts and relation between leaf weight and grain yield. *Agronomy Journal*, Madison, v. 54, n. 2, p. 145-148, Mar/Apr. 1962.

HERSCHBACH, C. DE KOK, L. J. RENNENBERG, H. Net uptake of sulphate and its transport to shoot in spinach plants fumigated with H<sub>2</sub>S or SO<sub>2</sub>. Does atmospheric sulfur affect the “inter-organ” regulation of sulfur nutrition. *Botânica Acta*, Stuttgart, v. 108, p. 41-46, 1995a.

HERSCHBACH, C. DE KOK, L. J. RENNENBERG, H. Net uptake of sulphate and its transport to short in tobacco plants fumigated with H<sub>2</sub>S or SO<sub>2</sub>. *Plant and Soil*, Dordrecht, v. 175, n. 1, p. 75-84, Aug. 1995b.

HOROWITZ, N. MEURER, E. J. Oxidação do enxofre elementar em solos tropicais. *Ciência Rural*, v. 36, n. 03, p. 822-828, 2006.

KARLEN, D. L. FLANNERY, R. L. SADLER, E. J. Aerial accumulation and partitioning of nutrients by corn. *Agronomy Journal*. 80:232-242, 1988.

KARLEN, D. L. SADLER, E. J. CAMP, C. R. Dry matter, nitrogen, phosphorus and potassium accumulation rates by corn on Norfolk Loamy Sand. *Agron. J.* 79: 649-656, 1987.

LARA CABEZAS, W. A. R.. SOUZA, M. A. Volatilização de amônia, lixiviação de nitrogênio e produtividade de milho em resposta à aplicação de misturas de uréia com sulfato de amônio ou com gesso agrícola. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, vol. 32, núm. 6, 2008, p. 2331-2342. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. Viçosa, Brasil

MALAVOLTA, E. Manual de nutrição mineral de plantas. São Paulo: Agronômica Ceres, 2006. 638p.

MELO, W. J. FERREIRA, M. E. Fatores do solo afetando a produtividade da cultura do arroz de sequeiro: três fatores biológicos. In: SIMPÓSIO SOBRE A CULTURA DO ARROZ DE SEQUEIRO. Jaboticabal, 1983. Anais Jaboticabal, FCAV, 1983, p. 99-136.

MENGEL, K. KIRKBY, E. A. Principles of plant nutrition. 3. ed. Bern: Potash Institute, 687 p. 1987.

MIYAZAWA, M. PAVAN, M. A. MURAOKA, T. CARMO, C. A. F. S. D. MELO, W. J. DE. Análise química de tecido vegetal. IN: SILVA, F. C. D. Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. 2ª ed. Brasília-DF. Embrapa Informação Tecnológica, 2009.

NOGUEIRA, M. A. MELO, W. J. Enxofre disponível para a soja e atividade de sulfatase em solo tratado com gesso agrícola (1) R. Bras. Ci. Solo, 27: 655-663, 2003

NORMAN, A. L. GIESEMANN, A. KROUSE, H. R. JÄGER, H. J. Sulphur isotope of Agronomy, v. 17, p. 1-9, 2002.

OLIVEIRA, M. A. D. A importância do enxofre para as culturas. Boletim Informativo, Serrana Fertilização, jun/jul, 2007.

OSÓRIO FILHO, B. D. Dinâmica de enxofre no sistema solo e resposta das culturas à adubação sulfatada – Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Santa Maria, RS, Brasil. 2006.

PAIVA P. J. R. NICODEMO, M. L. F. Enxofre no sistema solo-planta-animal. Ministério da agricultura do abastecimento e da reforma agrária. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Gado de Corte-CNPGC. Campo Grande, MS, 1994.

RAIJ, B. V. 2008. Gesso na Agricultura. Campinas: Instituto Agronômico de Campinas, 233 p. 2008.

RAIJ, B. V. ANDRADE, J. C. CANTARELLA, H. QUAGGIO, J. A. (Ed.). Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais. Campinas: Instituto Agronômico, 2001. 285p.

RAIJ, B. V. Fertilidade do solo e adubação. Piracicaba: CERES/POTAFÒS, 343p. 1991.

REHN, G. W. Sulfur Management for Corn Growth with Conservation Tillage. Published in Soil Sci. Soc. Am. J. 69:709-717, 2005.

RHEINHEIMER, D. D. S. RASCHE, J. W. A. OSÓRIO FILHO, B. D. SILVA, L. S. DA. Resposta à aplicação e recuperação de enxofre em cultivos de casa de vegetação em solos com diferentes teores de argila e matéria orgânica. Ciência Rural, Santa Maria, v.37, n.2, p.363-371, mar - abr, 2007. ISSN 0103-847

RICHART, A. LANA, M. DO C. SCHULZ, L. R. BERTONI, J. C. BRACCINI, A. DE L. Disponibilidade de fósforo e enxofre para a cultura da soja na presença de fosfato natural reativo, superfosfato triplo e enxofre elementar. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 30: 695-705, 2006.

SANTOS, H. G. D. JACOMINE, P. K. T. ANJOS L. H. C. D. OLIVEIRA. V. A. DE. LAMBRERAS, J. F. COELHO, M. R. ALMEIDA, J. A. DE. CUNHA, T. J. F. OLIVEIRA J. B. DE. Sistema Brasileiro de Classificação do solo. Brasília. Embrapa, 2013. 353. P. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 3. ed. Rio de Janeiro: Embrapa. (2013).

SAYRE, J. D. Mineral accumulation in corn. *Plant Physiology*, Rockville, v. 23, n. 3, p. 267-281, July 1948.

SILVA, D. J. VENEGAS, V. H. A. RUIZ, H. A. SANT'ANA, R. Translocação e redistribuição de enxofre em plantas de milho e de soja. *Pesquisa Agropecuária brasileira*. Brasília, v. 38, n. 6, p. 715-721, jun, 2003.

SILVA, F. C. D. ABREU, M. F. D. PEREZ, V. D. EIRA, P. A. D. ABREU, C. A. D. RAIJ, B. V. GIANELLO, C. COELHO, A. M. QUAGGIO, J. A. TEDESCO, M. J. SILVA, C. A. BARRETO, W. D. O. Métodos de análises químicas para avaliação da fertilidade do solo. IN: SILVA, F. C. D. Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. 2ª ed. Brasília-DF. Embrapa Informação Tecnológica, 2009.

SILVA. D. J. VENEGAS, V. H. A. RUIZ, H. A. Transporte de enxofre para as raízes de soja em três solos de Minas Gerais. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 8, p. 1161-1167, 2002.

SOARES, E. BOARETO A. E. LIMA, L. A. Efeito da adição de enxofre na cultura do milho. *Revista de agricultura*, Piracicaba, v. 58, n. 4, p. 341-350, dez. 1983.

STEWART, B. A. PORTER, L. K. Nitrogen-sulfur relationships in whwat (*Triticum aestivum*, L.), corn (*Zea mays*), and beans (*Phaseolus vulgaris*). *Agronomy Journal*, Madison, v. 61, n. 2, p. 267-271, Mar./Apr. 1969.

STIPP, S. R. CASARIN, V. A importância do enxofre na agricultura brasileira. *Informações Agrônomicas*. 2010.

TIECHEY, T. SANTOS D. R. D. RASCHE, J. W. A. BRUNETO, G. MALLMAN, F. J. K. PICCIN. Resposta de culturas e disponibilidade de enxofre em solos com diferentes teores de argila e matéria orgânica submetidas à adubação sulfurada. *Bragantia*, Campinas, v. 71, n. 4 p. 518-527, 2012.

VASCONCELLOS, C. A. BARBOSA, J. V. A. SANTOS, H. L. DOS. FRANÇA, G. E. D. Acumulação de massa seca e de nutrientes por dois híbridos de milho com e sem irrigação suplementar. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 18, n. 8, p. 887-901, ago. 1983.

VITTI, G. C. Enxofre do solo. In: BULL, L. T. ROSOLEM, C. A. (Ed.). Interpretação de análise química de solo e planta para fins de adubação. Botucatu: Fundação de Estudos e Pesquisas Agrícolas e Florestais, 1989. p. 129-173.

VON PINHO, R. G. BORGES, I. D. ANDRADE, J. L. DE. REIS, M. C. D. Marcha de absorção de macronutrientes e acúmulo de matéria seca em milho. *Revista Brasileira de Milho e Sorgo*, v. 8, n. 2, p. 157-173, 2009.

ZHAO, F. T. HAWKESFORD, M. T. WARRILOW, A. G. S. McGRANTH, S. P. CLARKSON, D. T. Responses of two wheat varieties to sulphur addition and diagnosis of sulphur deficiency. *Plant and Soil*, Crawley, v. 181, p. 317-327, 1996.

## CAPÍTULO 3

### RESPOSTA DE FONTES E DOSES DE ENXOFRE NO DESENVOLVIMENTO DA CULTURA DO MILHO SOB ESTRESSE HÍDRICO EM SOLO TROPICAL

#### RESUMO

LOPES, RICARDO DOS SANTOS. **Resposta de fontes e doses de enxofre no desenvolvimento da cultura do milho sob estresse hídrico em solo tropical.** 2017. Cap. 3, p.56-72) Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal do Piauí, PI<sup>1</sup>.

**Resumo** - O enxofre apresenta importância no desenvolvimento das plantas, no entanto existem no Brasil poucas pesquisas, sendo o macronutriente menos estudado. Entretanto o cultivo intenso de práticas agrícolas sem a reposição do nutriente, os estoques vem decrescendo e diversos trabalhos indicam a eficiência de enxofre (S) para as culturas, entre elas o milho. Dessa forma, objetivou-se avaliar a resposta da cultura do milho sob a adubação com fontes e doses de enxofre sob estresse hídrico em Latossolos do Cerrado do Sul do Piauí. O experimento foi conduzido na Serra do Quilombo, no município de Bom Jesus – PI. O delineamento experimental utilizado foi blocos ao acaso, com 4 repetições. Os tratamentos foram dispostos em esquema fatorial, com tratamento adicional,  $3 \times 4 + 1$ , totalizando 52 unidades experimentais. Como fonte de enxofre foi utilizada o gesso, o superfosfato simples e o sulfogran, e as doses fornecidas foram 0, 15, 30, 45 e 60 kg ha<sup>-1</sup> de S a lanço antes do plantio. Foram avaliados os seguintes parâmetros: número de fileiras por espigas (NFE), número de grãos por fileiras (NGF), peso de 1000 grãos (P1000G) e produtividade. Os parâmetros avaliados do desenvolvimento da cultura do milho são diretamente afetados pelo estresse hídrico. O número de grãos por fileiras decresceram os valores com as doses de 30, 45 e 60 kg ha<sup>-1</sup>. Adubação com 30 kg ha<sup>-1</sup> de sulfato promove o maior número de fileiras por espiga, na média das fontes. O peso de 1000 grãos cresce linearmente com aplicação de doses de enxofre até 45 kg ha<sup>-1</sup>, decrescendo na dose maior. A aplicação de S na forma de gesso dose de 15 kg ha<sup>-1</sup> proporcionou melhor efeito na produtividade de grãos, sendo a melhor dose para o Cerrado. A baixa resposta da cultura de milho às doses de sulfato nas três fontes pode ser consequência dos teores de sulfato presentes nos solos serem próximos dos níveis para a cultura, e isso associado as irregularidades pluviométricas durante o ciclo da cultura, no decorrer do experimento, os quais foram abaixo da média histórica.

**Palavras-chave** - Cerrados, MATOPIBA, produtividade de milho, fertilidade do solo, milho (*Zea Mays*).

---

<sup>1</sup> Orientador: Márcio Cleto Soares de Moura – CCN/UFPI

## CHAPTER 3

### RESPONSE OF SOURCES AND SULFUR DOSES IN THE DEVELOPMENT OF CORN CULTURE UNDER WATER STRESS IN TROPICAL SOIL

#### ABSTRACT

LOPES, RICARDO DOS SANTOS. **Response of sulfur sources and rates in the development of maize under water stress in tropical soils.** 2017. Chapter 3, p.56-72) Dissertation (Masters in Soils and Plant Nutrition) - Federal University of Piauí, PI.

**Abstract** - Sulfur is important in the development of plants, however there are few studies in Brazil, the macronutrient being less studied. However, the intense cultivation of agricultural practices without nutrient replacement, the stocks have been decreasing and several studies indicate the sulfur (S) efficiency for crops, among them maize. Thus, the objective of this study was to evaluate the corn crop response under fertilization with sources and sulfur doses under water stress in Oxisols of the Cerrado do Sul do Piauí. The experiment was conducted in the Serra do Quilombo, Bom Jesus - PI municipality. The experimental design was a randomized complete block, with 4 replicates. The treatments were arranged in a factorial scheme, with additional treatment,  $3 \times 4 + 1$ , totaling 52 experimental units. As sulfur source, gypsum, single superphosphate and sulfuran were used, and the doses given were 0, 15, 30, 45 and 60 kg ha<sup>-1</sup> of S before planting. The following parameters were evaluated: number of rows per spike (NFE), number of grains per rows (NGF), weight of 1000 grains (P1000G) and productivity. The evaluated parameters of corn crop development are directly affected by water stress. The number of grains per row decreased with the values of 30, 45 and 60 kg ha<sup>-1</sup>. Fertilization with 30 kg ha<sup>-1</sup> of sulphate promotes the highest number of rows per ear at the mean of the sources. The weight of 1000 grains grows lineramente with application of sulfur doses up to 45 kg ha<sup>-1</sup>, decreasing in the higher dose. The application of S in the form of a 15 kg ha<sup>-1</sup> dose gypsum gave a better effect on grain yield, being the best dose for the Cerrados. The low corn crop response to the sulfate doses in the three sources may be a consequence of the sulfate levels present in the soil being near the levels for the crop, and this is associated with the rainfall irregularities during the crop cycle during the experiment. Which were below the historical average.

**Key words** - Cerrados, MATOPIBA, corn yield, soil fertility, maize (*Zea Mays*).

---

<sup>1</sup> Advisor: Márcio Cleto Soares de Moura – CCN/UFPI

## 1. INTRODUÇÃO

Por desempenhar papel importante na produção nacional de grãos, o milho se destaca como influenciador direto na economia brasileira. O Brasil é o terceiro maior produtor mundial, com uma produtividade média de 79 milhões de toneladas nos últimos 5 anos. Esta média é considerada baixa quando comparada com o maior produtor, os Estados Unidos, com 345,08 milhões de toneladas na safra 2015/2016 (Conab, 2016).

No solo, o enxofre (S) é encontrado predominantemente na forma orgânica. Assim, a capacidade do solo em suprir a demanda da planta pelo nutriente está estreitamente relacionada ao teor de matéria orgânica e sua mineralização, que gradualmente, disponibilizará o S na forma de sulfato para a solução do solo, o qual poderá ser absorvido pelas plantas (Tiecher et al. 2012).

A deficiência de S pode ser observada em algumas regiões do Brasil especialmente em solos do Cerrado, em razão destes apresentarem baixa fertilidade e associada ao baixo teor de matéria orgânica e ao aumento da exportação de S pelos grãos, causados por produtividades elevadas. Bem como ao deslocamento deste íon às camadas mais profundas acentuada pela aplicação de calcário e fósforo, onde não pode ser adsorvido devido aos menores teores de matéria orgânica e menores valores de pH (Broch et al. 2011; Rheinheimer et al. 2005; Vitti et al. 2007).

O enxofre, assim como outros nutrientes, apresenta importância no desenvolvimento das plantas, por fazer parte da constituição protéica, síntese de clorofila, formação de ferredoxina, entre outros constituintes (Alvarez et al. 2007).

As reservas de enxofre orgânico nos solos sem a interferência do homem dependem basicamente dos teores e tipos de argilominerais e óxidos, os quais protegem a matéria orgânica ao ataque microbiano, e das condições ambientais que aceleram ou retardam a atividade biológica. A disponibilidade do enxofre orgânico às plantas depende da sua transformação à forma inorgânica, quase que exclusivamente na forma de sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) (Rheinheimer et al. 2005).

As fontes mais utilizadas para suprir o S às plantas são o superfosfato simples, que contém 12% de S-sulfato, e o sulfato de amônio, com 24% de S-sulfato. A utilização de S-elementar, com mais de 90% de S, é uma alternativa que pode aumentar a concentração dos nutrientes nas formulações e reduzir os custos de produção, de transporte e de aplicação do fertilizante (Horowitz & Meurer 2006). A aplicação do

gesso agrícola é a forma mais barata e eficiente para se elevar os teores de sulfato no solo (Rheinheimer et al. 2005).

O superfosfato simples é um fertilizante de rápida solubilidade e com teor de 12% de  $S-SO_4^{2-}$  na sua composição, disponibilizando facilmente para as culturas (Broch et al. 2011). O gesso agrícola é uma importante fonte de  $Ca^{2+}$  e S para as culturas aumentando os teores principalmente no subsolo, o íon  $SO_4^{2-}$  pode promover o carreamento de outros elementos, como Mg e K, das camadas superficiais do solo para as maiores profundidades. Além disso, o gesso pode diminuir a toxidez do Al trocável, reduzindo a atividade desse elemento na solução do solo (Neis et al. 2010; Zandoná et al. 2015).

O S elementar é uma forma bastante usada em alguns países e recentemente tem despertado interesse no Brasil. Ele se destaca dos sais de sulfato por ter baixa solubilidade e por conter alta concentração de S (> 85%), comparada com 12% de superfosfato simples e 24% de sulfato de amônio. O S elementar não é prontamente disponível e sua utilização pelas plantas depende de sua oxidação a sulfato, realizada principalmente por microorganismos do solo. Além da alta concentração, o atrativo do S elementar é seu custo relativamente baixo, permitindo formulações com altos teores de N, P ou K (Cantarella, 2007).

As oscilações nas safras de milho, das principais regiões produtoras do Brasil, também estão associadas à disponibilidade hídrica, sobretudo no período crítico da cultura, que vai do pendramento ao início do enchimento de grãos (Matzenauer, 1994; Bergonci et al. 2001; Bergamaschi et al. 2004). Bergamaschi et al. (2004) constataram que pode haver redução de rendimento mesmo em anos climaticamente favoráveis, se o déficit hídrico ocorrer no período crítico, ou seja, da pré-floração ao início de enchimento de grãos.

Na região dos cerrados, os rendimentos das culturas, na época das chuvas, são afetados pelos dias sem chuva, fenômeno climático conhecido popularmente como veranico, que ocorrem regularmente durante os meses de janeiro ou fevereiro, coincidindo, muitas vezes, com o período de florescimento da planta (Espinoza, 1980). O milho tem sido tradicionalmente cultivado no Nordeste do Brasil em condições de agricultura de sequeiro, estando sujeito aos elevados riscos causados pela distribuição irregular das precipitações pluviais (Costa et al. 1988).

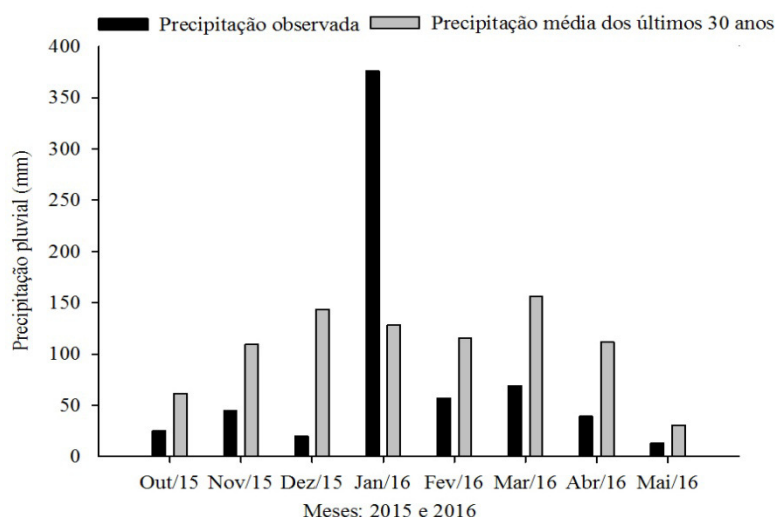
Há carência de estudos na comparação de fontes e doses de S utilizados para avaliar os componentes de produção e a produtividade do milho no Cerrado Piauiense. Dessa forma, objetivou-se com esse trabalho avaliar a viabilidade da adubação com



diferentes fontes e doses de enxofre no desenvolvimento da cultura do milho sob estresse hídrico, em solo de clima tropical.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi desenvolvido na safra agrícola 2015/2016 em condições de campo, em área particular manejada no sistema de plantio convencional, localizada na Serra do Quilombo município de Bom Jesus (PI), Brasil (09°16'17'' S e 44°47'15'' O e 628 m de altitude), o clima é quente e semiúmido do tipo Aw (Köppen), com temperatura variando de 18 a 36 °C. Na área predomina o solo do tipo Latossolo Amarelo distrófico (Santos et al. 2013). Dados da precipitação pluvial mensal na área durante a condução do experimento e a média histórica dos últimos 30 anos na região estão descritas na Figura 1 (BDMEP, 2016).



**Figura 1.** Precipitação pluvial observada durante a condução do experimento e precipitação pluvial média nos últimos 30 anos na área. Fonte: BDMEP (2016).

As características químicas (Tabela 1) do solo, nas camadas de 0 a 0,20 m e de 0,20 a 0,40 m, foram determinadas antes da condução do experimento, segundo método proposto por Raij et al. (2001). Quanto à granulometria, o solo apresentou 277, 672 e 51 g kg<sup>-1</sup> de argila, areia e silte, respectivamente, sendo classificado como textura média (Santos et al. 2013).

**Tabela 1.** Atributos químicos antes do experimento nas camadas de 0–20 e 20–40 cm.

Prof.	pH	P	S-SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	MO	Ca	Mg	Al	H+Al	K	CTC
(cm)	CaCl <sub>2</sub>	---mg dm <sup>-3</sup> ---	g dm <sup>-3</sup>	g dm <sup>-3</sup>	-----	-----	-----	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----	-----	-----
0-20	4,60	2,1	6,4	13,7	1,6	0,5	0,06	0,6	0,063	2,7
20-40	4,05	0,4	17,0	7,8	0,6	0,3	0,18	0,3	0,012	1,3

A área foi desmatada no ano de 2012 e aplicada seis toneladas de calcário dolomítico por hectare e incorporado ao solo. Nos anos agrícolas 2012/2013 e 2013/2014 foram

aplicados à lanço 110 kg ha<sup>-1</sup> de cloreto de potássio, já no ano agrícola 2014/2015 foram utilizados 230 kg ha<sup>-1</sup> de superfosfato triplo, tendo sido cultivado nos três anos cultura anual de soja.

Na safra 2015/2016 como parte deste trabalho foi semeada em 11 de janeiro de 2016 com milho variedade Híbrido Status Viptera 3, de ciclo precoce e utilizado na região. Antes do plantio foi adicionado a lanço 200 kg ha<sup>-1</sup> de cloreto de potássio e no sulco do plantio 220 kg ha<sup>-1</sup> da fórmula 10-49-00. Quinze dias após a semeadura foi feito o desbaste manual, deixando 3 plantas por metro linear e foi utilizado em cobertura 280 kg ha<sup>-1</sup> de ureia.

O delineamento experimental utilizado foi blocos ao acaso, com 4 repetições. Os tratamentos foram dispostos em esquema fatorial com tratamento adicional, 3 x 4 + 1, foram três fertilizantes sulfatados: sulfurgran (90% de S), superfosfato simples (12% de S) e gesso agrícola (15% de S) e quatro doses de S: 15, 30, 45 e 60 kg ha<sup>-1</sup>, mais o tratamento adicional, (testemunha sem adubação com S), totalizando 52 unidades experimentais (Tabela 2). A dose total do fertilizante a ser utilizado em cada unidade foi distribuída a lanço 57 dias antes do plantio do milho e foi constituída por seis linhas de 5,0 m de comprimento e 2,5 m de largura, com 0,45 m de espaçamento entre linhas. A área útil de cada unidade experimental foi obtida eliminando-se as duas linhas laterais e 1 m de cada extremidade, abrangendo uma área útil de 5,4 m<sup>2</sup> por parcela.

**Tabela 2.** Tratamentos utilizados no local do ensaio.

Tratamentos	Dose nutriente (kg ha <sup>-1</sup> )	Fonte
1	00	Controle
2	15	Sulfurgran
3	30	Sulfurgran
4	45	Sulfurgran
5	60	Sulfurgran
6	15	SFS
7	30	SFS
8	45	SFS
9	60	SFS
10	15	Gesso
11	30	Gesso
12	45	Gesso
13	60	Gesso

Superfosfato Simples com 12% de S, Sulfurgran com 90% de S e Gesso com 15% de S.

As quantidades aplicadas de cada fonte do adubo foram calculadas com base no teor de S nos adubos. Os tratos culturais (controle de plantas daninhas, pragas, doenças) anterior e posteriores a semeadura seguiram o manejo adotado pela Fazenda conforme necessidades da cultura.

No dia 02 de junho de 2016 as plantas foram colhidas e encaminhadas para o laboratório de química geral e analítica do Campus Professora Cinobelina Elvas em Bom Jesus-PI, em seguida foram trilhadas. Os parâmetros avaliados foram: número médio de grãos por fileiras (NGF), número médio de fileiras por espigas (NFE), peso de mil grãos (PMG) e a produtividade de grãos (13 % de umidade).

Os dados foram submetidos à análise de variância, sendo as médias comparadas pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade. Apresentando diferenças significativas foi realizada a análise de regressão. As análises foram realizadas com auxílio do programa SISVAR (Ferreira, 2000).

### **3. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Os teores de  $\text{SO}_4^{2-}$  na camada de 0 a 20 cm do solo (Tabela,1) antes da implantação do experimento, estavam acima do nível de suficiência para as culturas menos exigentes, que é de  $5\text{mg dm}^{-3}$ , de acordo com a classificação realizada pela Comissão de Química e Fertilidade do Solo do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina é de  $10\text{ mg dm}^{-3}$  para as espécies das famílias das fabáceas, brassicáceas e liliáceas (CQFS-RS/SC, 2004).

De acordo com a Figura 1, a distribuição pluviométrica durante a implantação do experimento foi irregular, e o estresse hídrico causa grande impacto no rendimento de grãos, durante este período, por afetar o número de espigas por planta e o número de grãos por espiga. Durante o período vegetativo, o déficit hídrico reduz o crescimento do milho, em função de decréscimos da área foliar e da biomassa, os efeitos sobre a produção de grãos são atenuados posteriormente, se as condições hídricas se tornarem favoráveis, o que poderá garantir níveis satisfatórios de rendimento de grãos (Bergamasch et al. 2006). Por outro lado, se o déficit hídrico ocorrer no período crítico, ou seja, da pré-floração ao início do enchimento de grãos pode prejudicar diretamente os fatores de desenvolvimento da cultura.

O resumo da análise de variância (Tabela 3) para as características de número médio de grãos por fileiras (NGF), número médio de fileiras por espigas (NFE), peso de mil grãos (g) (PMG) e produtividade de grãos ( $\text{kg ha}^{-1}$ ). Houve diferença significativa entre as fontes de enxofre apenas para a produtividade de grãos, já para as doses de

enxofre ocorreu diferença significativa para o NFE, PMG e produtividade de grãos, enquanto que a interação fonte\*dose foi significativa para NGF e produtividade.

**Tabela 3.** Resumo da análise de variância para o número médio de grãos por fileiras (NGF), número médio de fileiras por espigas (NFE), peso de mil grãos (g) (PMG) e produtividade (kg ha<sup>-1</sup>) de milho submetido a fontes e doses de enxofre.

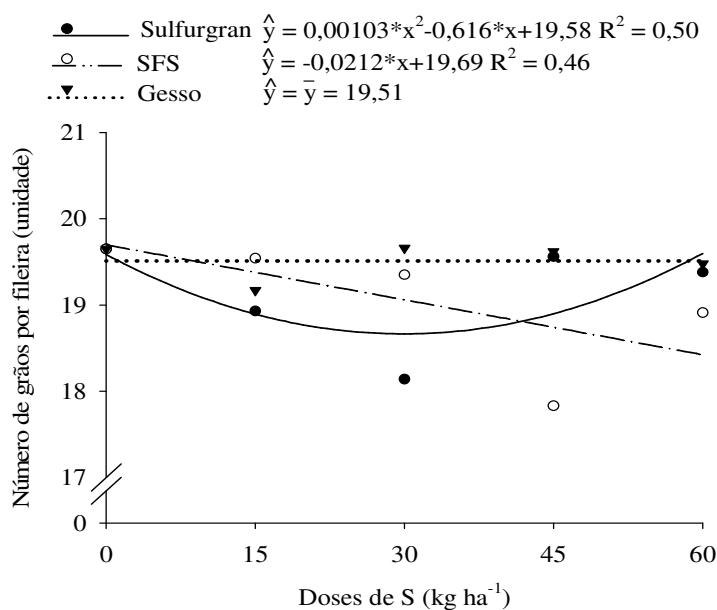
Fonte de variação	GL	NGF	NFE	PMG	Produtividade
		QM	QM	QM	QM
Bloco	3	0,34700 <sup>ns</sup>	0,07147 <sup>ns</sup>	144,665 <sup>ns</sup>	52.150,82 <sup>ns</sup>
Fontes de S	2	1,52461 <sup>ns</sup>	0,64771 <sup>ns</sup>	158,991 <sup>ns</sup>	923.421,97**
Doses de S	3	0,18339 <sup>ns</sup>	0,59576*	107,385*	87.387,57**
Fontes*Doses	6	1,96846*	0,26993 <sup>ns</sup>	224, 356 <sup>ns</sup>	203771,35**
Adicional*Fatorial	1	0,98008	0,58463	324,230	117.167,34
Resíduo	36	0,68368	0,30981	198,796	29.650,69
Total	51	0,82439	0,32656	194,141	91.621,17
Média		19,23783	16,01833	245,6641	2.553,45783
CV %		5,26	3,26	5,39	7,45

<sup>ns</sup> Não-significativo, \* e \*\* Significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente, pelo Skott-Knott.

Os coeficientes de variação (CV) foram baixos, variando entre 3,26 a 7,45%. Experimento conduzido a campo demonstra eficiente controle experimental. Soratto et al. (2010) em trabalhos de campo com fontes alternativas e doses de nitrogênio no milho safrinha em sucessão à soja encontraram CV (%) entre 2,9 e 7,5.

As doses de S apresentaram significância estatística na interação fonte\*doses na avaliação do número médio de grãos por fileira (Figura 2). As médias do NGF para as diferentes doses diferiram estatisticamente pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade, com equação quadrática para a fonte sulfúrico e linear para o superfosfato simples. Segundo Fancel & Dourando Neto (2004), o número de grãos é um dos mais importantes componentes de produção da cultura, o qual é bastante influenciado por eventos que ocorrem entre a emissão da quarta e a décima folha, momento em que a planta deve encontrar-se adequadamente nutrida.

Júnior et al. (2007) observaram aumento significativo no número de grãos por espigas quando utilizaram o dobro da dose recomendada de enxofre, assim, diferindo-se da testemunha. Souza et al. (2011) observaram aumento no número de grãos por fileira na espiga com aumento da dose de N, e conseqüentemente o número de grãos na espiga. Casagrande & Filho (2002) não verificaram efeito das doses de N no número de fileiras de grãos na espiga e de grãos por espigas. Souza & Soratto (2006) obtiveram incremento no número de grãos por espiga do milho com aplicação de N em cobertura.



**Figura 2.** Número de Grãos por Fileiras entre as doses com os fertilizantes: Sulfurgran, Superfosfato Simples (SFS) e Gesso.

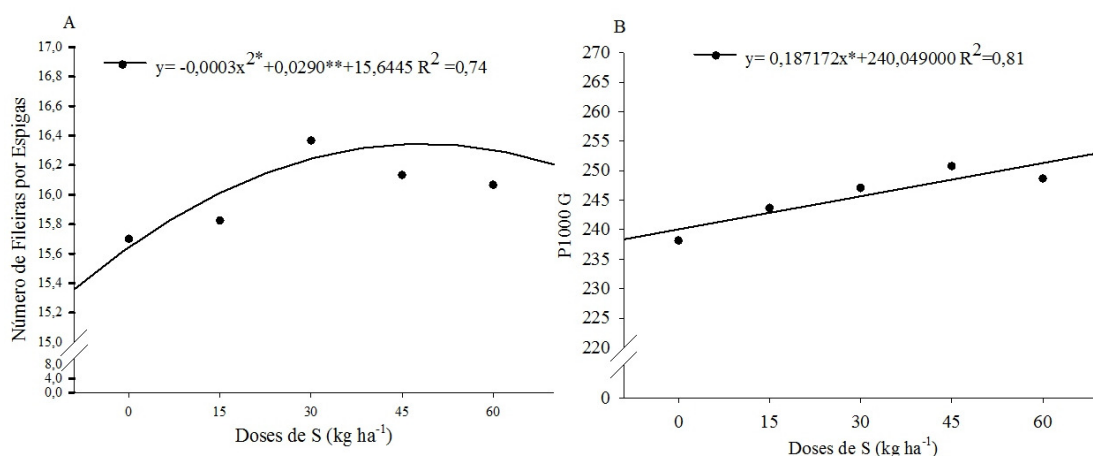
O número de grãos por fileira não respondeu a fonte gesso em nenhuma das doses avaliadas, acredita-se que a distribuição pluviométrica irregular durante o estágio de floração, formação do número de ovários e enchimento dos grãos das espigas tenha contribuído para redução da resposta da cultura. Segundo Westgate & Boyer (1985), o déficit hídrico induz à redução no fluxo de assimilados, causando acentuada diminuição no número de grãos por espiga. Quando o déficit hídrico ocorre durante o período crítico da cultura, a produtividade de grãos é afetada, reduzindo, principalmente, o número de grãos na espiga (Matzenauer, 1994; Bergonci et al. 2001).

O estresse hídrico causa grande impacto no rendimento de grãos, durante este período, por afetar o número de espigas por planta e o número de grãos por espiga. Durante o período vegetativo, o déficit hídrico reduz o crescimento do milho, em função de decréscimos da área foliar e da biomassa, os efeitos sobre a produção de grãos são atenuados posteriormente, se as condições hídricas se tornarem favoráveis, o que poderá garantir níveis satisfatórios de rendimento de grãos. Por outro lado, se o déficit hídrico ocorrer no período crítico, ou seja, da pré-floração ao início do enchimento de grãos (Bergamasch et al. 2006).

O NFE apresentou efeito significativo quanto às doses de S aplicadas (Figura 3), ajustando-se a equação quadrática para a média nas três fontes de S utilizada. A dose de 30 kg ha<sup>-1</sup> de S nas três fontes apresentou os maiores resultados no número de fileiras por espigas, com 16,65, 16,50 e 16,10, respectivamente para SFS, sulfurgran e gesso.

As médias das doses de enxofre nas fontes avaliadas foram significativas se ajustando a equação quadrática, com crescimento no número de fileiras por espigas até a dose de 30 kg ha<sup>-1</sup> de enxofre (Figura 3).

Para a média nas três fontes de enxofre as doses 45 e 60 kg ha<sup>-1</sup> (Figura 2) observou-se um decréscimo nos valores no NFE demonstrando a não necessidade de doses maiores para aumentar o NFE em cultura de milho e o maior valor foi encontrado na dose 30 kg ha<sup>-1</sup> se diferindo estatisticamente, evidenciando a dose 30 kg ha<sup>-1</sup> como a melhor eficiência para essa variável. Segundo Coelho (2006), a extração de enxofre pela planta de milho é pequena e varia de 15 a 30 kg ha<sup>-1</sup>, podendo justificar tais resultados para doses maiores que esses valores. Justificando que doses de enxofre acima de 30 kg ha<sup>-1</sup> podem não aumentam o numero de fileiras por espigas no milho, em condições de estresse hídrico em Latossolo do Cerrado.



**Figura 3.** Médias das doses de S para o Numero de Fileiras por Espigas (A) e Peso de 1000 G (B) em função das doses com os fertilizantes: Superfosfato Simples (SFS), Sulfurgran e Gesso.

As fontes de enxofre avaliadas não apresentaram diferença estatística entre se, resultando em valores bem semelhantes e a maior eficiência entre os adubos para o numero médio de fileiras por espiga foi encontrado na fonte superfosfato simples, mas sendo estatisticamente iguais entre si.

O peso de mil grãos de milho apresentou significância estatística pelo incremento das doses de enxofre na média das fontes aplicadas (Figura 4), ajustes com equação linear, atingindo o maior valor para a dose de 45 kg ha<sup>-1</sup> na média das fontes avaliadas.

Assim como no número médio de fileiras por espiga o SFS também obteve a maior média entre as fontes na avaliação da massa de 1000 grãos, porém não se diferiu estatisticamente entre as médias das demais fontes avaliadas e o tratamento controle sem enxofre. De acordo com autores isso ocorre em função da alta e rápida solubilidade e disponibilidade dos nutrientes do superfosfato simples (Broch et al. 2011).

Resultados em crescimento linear com a média das doses houve resposta das doses de enxofre nas fontes utilizadas para o aumento no peso de 1000 grãos de milho, crescendo até a dose de 45 kg ha<sup>-1</sup> (Figura 3). Mesmo em situação de estresse hídrico, as diferentes doses de enxofre podem influenciar a massa de grãos de milho cultivados em Latossolos do Cerrados. É importante avaliar o efeito do déficit hídrico em períodos mais restritos e precisos, quando o impacto é mais severo, para salientar as relações de causa-efeito (Bergamasch et al. 2006).

Durante o crescimento vegetativo na etapa fenológica, o milho é extremamente sensível ao déficit hídrico, em decorrência dos processos fisiológicos ligados à formação do zigoto e início do enchimento de grãos (Shussler & Westgate, 1991; Zinselmeier et al. 1995).

A produtividade do milho foi influenciada significativamente pela fonte de gesso na dose 15 kg ha<sup>-1</sup> de enxofre, com a maior produtividade entre as doses e fontes testadas, as demais doses do gesso diminuíram a produtividade quando se usou doses maior que 15 kg ha<sup>-1</sup>, se ajustando em equação quadrático a 1 e 5%.

O superfosfato simples oscilou sua produtividade entre valores que não seguiram os parâmetros para avaliar a função das doses na produtividade, se adequando a equação quadrática com um R<sup>2</sup> = 0,48 considerado baixo para relacionar interação entre doses e produção. No entanto ocorreu diferença estatística na produtividade entre suas doses e com o tratamento controle.

O sulfurgran não apresentou efeitos significativos em fontes e doses, não se adequando as equações (Figura 5). Para o SFS e o sulfurgran as produtividades foram menores que o tratamento controle, não apresentando resposta satisfatória na produtividade com a utilização das duas fontes.

Verifica-se que, em anos mais secos como observado no ano de execução do trabalho, pode ser mais vantajoso não adubar com nenhuma das fontes utilizadas neste trabalho, pois o tratamento controle sem enxofre foi o que apresentou maior produtividade. Com exceção a dose 15 kg ha<sup>-1</sup> de gesso, como fontes de S, deferindo estatisticamente pelo teste de Skott-Knott ao nível 1 e 5% de probabilidade. Apresentando a melhor resposta na produtividade em relação às demais doses nas fontes, com ponto de máxima produtividade uma dose estimada de 23 kg/ha<sup>-1</sup> de gesso.

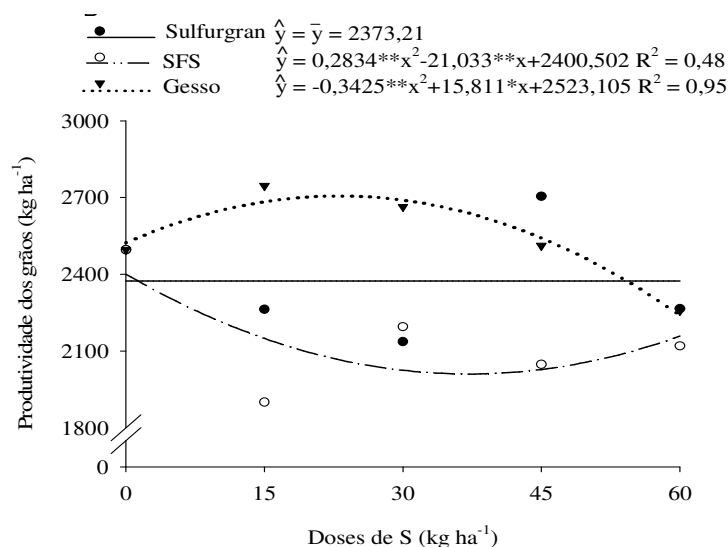
Resposta de culturas à adubação sulfatada estabelecida pela Comissão de Química e Fertilidade do Solo (RS/SC) para o teor de enxofre disponível no solo nem sempre possui relação com a produção das plantas (Tiechey et al. 2012). Penariol et al. (2003)

destacam que a produtividade do milho pode ficar comprometida se a deficiência hídrica coincidir com o período do florescimento, fase que determina a quantidade de óvulos a serem fecundados, e por consequência, a produção de grãos.

Na etapa fenológica e na capacidade produtiva, o milho é extremamente sensível ao déficit hídrico, em decorrência dos processos fisiológicos ligados à formação do zigoto e início do enchimento de grãos (Shussler & Westgate, 1991; Zinselmeier et al. 1995; Bergamasch et al. 2006).

Dados controversos a esse trabalho na utilização de fontes de S na produtividade pode ser observado por Broch e Fernandes (2000) que verificaram aumento da produtividade do milho safrinha com o fornecimento de N e S. Lara Cabezas et al. (2005) verificaram que aplicação do sulfato de amônio proporcionou acréscimos significativos de grãos de milho, em relação à aplicação de uréia. Souza et al. (2011) afirmam que, o enxofre presente no sulfato de amônio deve ter contribuído para melhor resposta pela planta.

Vilela et al. (1995) relataram que na aplicação de sulfato, o tratamento que recebeu 36 kg ha<sup>-1</sup> de sulfato proporcionou uma produtividade de 2.047 kg ha<sup>-1</sup>, acima da produtividade observada para o tratamento sem S.



**Figura 4.** Produtividade dos grãos de milho em função das fontes e doses de S com os fertilizantes: Superfosfato Simples (SFS), Sulfurgran e Gesso.

Com essas referências e resultados para as doses utilizadas no experimento, a dose de 15 kg ha<sup>-1</sup> de gesso obteve significância para aumento da produtividade de milho em relação às demais doses nas fontes utilizadas, e aumento na produção em comparação com o controle em áreas de solos do Cerrado, levando em consideração as irregularidades pluviométricas encontradas nesta safra, mesmo assim, não é vantajosa a



adubação com enxofre nestas condições, pois essa adubação tem um custo, e nos tratamentos sem adubo de enxofre em condição de estresse hídrico tiveram produtividades sem custo com fontes de fertilizantes com enxofre.

De acordo com Rheinheimer et al. (2005), a produtividade do milho aumentou com a aplicação de sulfato e o máximo rendimento foi obtido com a aplicação de 53,5 kg ha<sup>-1</sup>, valores bem maiores aos encontrados neste trabalho. Os autores afirmam ainda que a obtenção de altos rendimentos da cultura só é possível quando todos os fatores de produção são manejados corretamente. Entretanto no Nordeste do Brasil a produtividade das culturas é constantemente influenciada pelas condições pluviométricas.

Zandoná et al. (2015) avaliaram a produtividade de milho e soja à aplicação de gesso e observaram incremento de 9,3% na produtividade do milho até a dose de 2 t ha<sup>-1</sup>, e a provável resposta está no aumento dos teores de Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup> nas camadas do solo de 0-10 cm e 10-20 cm de profundidade, suprimindo as exigências da cultura e proporcionando alta produtividade. Na ocasião do experimento não houve deficiência hídrica durante o período de floração da cultura. Caires et al. (2011) também observaram incremento de 9 % na produtividade de milho, na ausência de déficit hídrico em Latossolo.

Sousa e Soratto (2006) encontraram baixa produtividade de grãos, provavelmente sendo explicada pela reduzida e má distribuição da precipitação ocorrida durante o desenvolvimento da cultura. Estresse hídrico durante a fase reprodutiva do milho limita o desenvolvimento da espiga, altera a sincronia entre o florescimento masculino e feminino, além de limitar a translocação de carboidratos para os grãos, podendo também afetar a resposta da planta aos nutrientes (Fancelli & Dourado Neto, 2004).

A baixa resposta da cultura de milho à doses de sulfato nas três fontes pode ser consequência dos teores de sulfato presentes no solo está próximo dos níveis para cultura mais exigentes, e isso associado as irregularidades pluviométricas.

#### **4. CONCLUSÃO**

Os parâmetros avaliados no desenvolvimento da cultura do milho são diretamente afetados pelo estresse hídrico, encontrado durante a implantação do experimento.

A aplicação de S na forma de Gesso dose de 15 kg ha<sup>-1</sup> proporcionou melhor efeito na produtividade de grãos.

A baixa resposta da cultura do milho á doses de sulfato nas três fontes pode ser conseqüência dos teores de sulfato presentes no solo está próximo dos níveis de exigência da cultura do milho.

A melhor produtividade sob estresse hídrico ocorre na ausência de adubação com enxofre.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVAREZ, V. H. ROSCOE, R. KURIHARA, C. H. PEREIRA, N. de F. Enxofre. In: NOVAIS, R. F. ALVAREZ V, V. H. BARROS, N. F. de. FONTES, R. L. F. CANTARUTTI, R. B. NEVES, J. C. L. (Eds). Fertilidade do solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo SBCS. 2007. P. 595-644.

BDMEP - Banco de Dados Meteorológico para o Ensino e Pesquisa. Série histórica. Dados mensais. Bom Jesus (PI). [2016]. Brasília: Instituto Nacional de Meteorologia, [2016]. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>>. Acesso em: out. 2016.

BERGAMASCHI, H. DALMAGO, G. A. BERGONCI, J. I. BIANCHI, C. A. M. MÜLLER, A. G. COMIRAN, F. HECKLER, B. M. M. Distribuição hídrica no período crítico do milho e produção de grãos. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.39, p.831-839, 2004.

BERGAMASCHI, H. DALMAGO, G. A. COMIRAN, F. BERGONCI, J. I. MÜLLER, A. G. FRANÇA, S. SANTOS, A. O. RADIN, B. BIANCHI, C. A. M. E PEDRO GABERT PEREIRA. Deficit hídrico e produtividade na cultura do milho. Pesq. agropec. bras. Brasília, v.41, n.2, p.243-249, fev. 2006.

BERGONCI, J. I. BERGAMASCHI, H. SANTOS, A. O. FRANÇA, S. RADIN, B. Eficiência da irrigação em rendimento de grãos e matéria seca de milho. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.36, p.949-956, 2001.

BROCH, D. L. FERNANDES, C. H. Efeito da adubação de plantio e de cobertura na produtividade do milho safrinha. POTAFOS - Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato. Informações Agrônomicas nº 89 – março/2000.

BROCH, D. L. PAVINATO, P. S. POSSENTINI, J. C. THOMAS, N. M. QUIQUI, E. M. D. Produtividade da soja no cerrado influenciado pelas fontes de enxofre. Revista Ciência Agrônômica, v.42, n.3p. 791-796 jul - set, 2011. Centro de Ciências Agrárias – Universidade Federal de Ceará, Fortaleza, CE.

CAIRES, E. F. GARBUIO, F. J. CHURKA, S. JORIS, H. A. W. Use de gypsum for crop grain production under a subtropical no-till cropping system. *Agronomy Journal*, Madison, v. 103, n. 6, p. 1804-1814, 2011.

CANTARELLA, H. Nitrogênio. In: NOVAIS, R. F. ALVAREZ, V. V. H. CANTARUTTI, R. B. NEVES, J. C. L. (Ed.). Fertilidade do Solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 375-470.

CASAGRANDE, J. R. R. FILHO, D. F. Adubação nitrogenada na cultura do milho safrinha. *Pesq. agropec. bras.* Brasília, v. 37, n. 1, p. 33-40, jan. 2002.

COELHO, A. M. Solos e Nutrição de Plantas. Embrapa Milho e Sorgo, Circular Técnico, Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento – 157, Sete lagoas – MG, 2006.

CONAB. Acompanhamento da safra brasileira de grãos, V. 3- SAFRA 2015/16- N. 11- Décimo primeiro levantamento. AGOSTO 2016. <[http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/16\\_08\\_09\\_09\\_00\\_07\\_boletim\\_graos\\_agosto\\_2016\\_.pdf](http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/16_08_09_09_00_07_boletim_graos_agosto_2016_.pdf)> Acesso em dezembro de 2016.

COSTA, J. O. FERREIRA, L. G. R. SOUZA, F. DE. Produção do milho submetido a diferentes níveis de estresse hídrico. *Pesq. agropec. bras.* Brasília, 23(11):1255-1261, nov. 1988.

CQFS RS/SC – COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO. Manual de adubação e calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. 10. ed. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo – Núcleo Regional Sul, 2004. 400p.

ESPINOZA, W. AZEVEDO, J. ROCHA, L. A. Densidade de plantio e irrigação suplementar na resposta de três variedades de milho ao déficit hídrico na região dos cerrados. *Pesq. Agropec. Bras.*, Brasília, 15:85-95, jan. 1980.

FANCELLI, A. L. DOURADO NETO, D. Produção de milho. 2. ed. Guaíba: Agropecuária, 2004. 360 p.

FERREIRA, D. F. Análises estatísticas por meio do SISVAR (Sistema para Análise de Variância) par Windows 4. 0. UFSCar, 2000.

HOROWITZ, N. MEURER, E. J. Oxidação do enxofre elementar em solos tropicais. *Ciência Rural*, v. 36, n. 03, p. 822-828, 2006.

JÚNIOR, A. C. G. TRAUTMANN, R. R. MARENGONI, N. G. RIBEIRO, O. L. SANTOS, ALEXANDRE L. D. Produtividade do milho em resposta a adubação com NPK e Z em Argissolo Vermelho Amarelo eutroférico. *Em ciência e Agrotecnologia*. Agosto, 2007.

LARA CABEZAS, W. A. R. ARRUDA, M. R. CATARELLA, H. PAULETTI, V. TRIVELIN, P. C. O. BENDASSOLLI, J. A. Imobilização de nitrogênio da uréia e do sulfato de amônio aplicado em pré-semeadura ou cobertura na cultura de milho, no sistema plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 29, p. 215-226, 2005.

MATZENAUER, R. Modelos agrometeorológicos para estimativa do rendimento de milho, em função da disponibilidade hídrica no Estado do Rio Grande do Sul. 1994. 172p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

NEIS, L. PAULINO, H. B. DE SOUZA, E. D. REIS, E. F. PINTO, F. A. Gesso agrícola e rendimento de grãos de soja na região do sudeste de Goiás. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 34, n. 2, p. 409-416, 2010.

PENARIOL, F. G. FORNASIERI FILHO, D. COICEV, L. BORDIN, L. FARINELLI, R. Comportamento de cultivares de milho semeado em diferentes espaçamentos entre linhas e densidades populacionais, na safrinha. *Revista Brasileira de Milho e Sorgo*, v. 02, p. 52-60, 2003.

RHEINHEIMER, D. DOS S. ALVAREZ, J. W. R. FILHO, B. D. O. SILVA, L. S. DA. BORTOLUZZY, E. C. Resposta de culturas à aplicação de enxofre e a teores de sulfatos em solo de textura arenosa sob plantio direto. *Ciência Rural*, Santa Maria, v. 35, n. 3, p. 562-569, mai - jun, 2005.

SANTOS, H. G. D. JACOMINE, P. K. T. ANJOS L. H. C. dos. OLIVEIRA. V. A. DE. LAMBRETTAS, J. F. COELHO, M. R. ALMEIDA, J. A. DE. CUNHA, T. J. F. OLIVEIRA J. B. DE. Sistema Brasileiro de Classificação do solo. Brasília. Embrapa, 2013. 353. P. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 3. ed. Rio de Janeiro: Embrapa. (2013).

SCHUSSLER, R. J. WESTGATE, M. E. Maize kernel set at low potential. I. Sensivity to reduced assimilates during early kernel growth. *Crop Science*, v.31, p.1189-1195, 1991.

SORATTO, R. P. PEREIRA, M. COSTA, T. A. M. LAMPERT, V. DO N. Fontes alternativas e doses de nitrogênio no milho safrinha em sucessão à soja. *Revista Ciência Agronômica*, v. 41, n. 4, p. 511-518, out - dez 2010. Centro de Ciências Agrárias – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE.

SOUSA, E. DE F. C. SORATTO, R. P. Efeito de fontes de doses de nitrogênio em cobertura, no milho safrinha, em plantio direto. *Revista Brasileira de Milho e Sorgo*, v. 5, n. 3, p. 395-409, 2006.

SOUZA, J. A. BUZZETTI, S. FILHO, M. C. M. T. ANDREOTTI, M. SÁ M. E. DE. ARF, O. Adubação nitrogenada na cultura do milho safrinha irrigada em plantio direto. *Bragantia*. Campinas, v. 70, n. 2, p. 447-454, 2011.

TIECHEY, T. SANTOS D. R. DOS. RASCHE, J. W. A. BRUNETO, G. MALLMAN, F. J. K. PICCIN. Resposta de culturas e disponibilidade de enxofre em solos com diferentes teores de argila e matéria orgânica submetidas à adubação sulfurada. *Bragantia*, Campinas, v. 71, n. 4 p. 518-527, 2012.

VILELA, L. RITCHEY, K. D. SILVA, J. E. Resposta da soja e do milho ao enxofre num Latossolo Vermelho Escuros sob vegetação de cerrado do Distrito Federal. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v. 19, p. 281-285, 1995.

VITTI, G. C. FAVARIN, J. L. GALLO, L. A. PIEDADE, S. M. S. FARIA, M. R. M. CICARONE, F. Assimilação foliar de enxofre elementar pela soja. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 42, n. 02, p. 225-229, 2007.

WESTGATE, M. E. BOYER, J. S. Carbohydrate reserves and reproductive development at low leaf water potentials in maize. *Crop Science*, v.25, p.762-769, 1985.

ZANDONÁ, R. R. BEUTLER, A. N. BURG, G. M. BARRETO, C. F. SCHMIDT, M. R. Gesso e calcário aumentam a produtividade e amenizam a efeito do déficit hídrico em milho e soja. Pesquisa Agropecuária. Tropical, Goiânia, v. 45, n. 2, p. 128-137, abr/jun, 2015.

ZINSELMEIER, C. WESTGATE, M. E. JONES, R. J. Kernel set at low water potential does not vary with source sink/ratio in maize. Crop Science, v.35, p.158-164, 1995.

## ANEXOS

**Tabela 1.** Resumo da análise de variância para os macronutrientes avaliados na folha de milho submetido a fontes e doses de enxofre.

		P	K	Ca	Mg	S	N
Fonte de variação	GL	MS	MS	MS	MS	MS	MS
Bloco	3	0,138 <sup>ns</sup>	0,327 <sup>ns</sup>	0,067 <sup>ns</sup>	0,200*	0,013 <sup>ns</sup>	0,109
Fontes de S	2	0,345 <sup>ns</sup>	0,171 <sup>ns</sup>	43,642**	2,293**	1,559**	128,412**
Doses de S	3	0,531 <sup>ns</sup>	1,035*	17,125**	0,532**	0,087 <sup>ns</sup>	20,890**
Fontes*Doses	6	1,818*	3,196**	3,562**	0,154 <sup>ns</sup>	0,500**	54,765**
Adicional*Fatorial	1	0,009 <sup>ns</sup>	2,288*	1,728**	0,541*	0,306*	
Resíduo	36	0,280	0,321	0,115	0,139	0,107	0,207
Total	51	0,464	0,740	3,257	0,260	0,208	750,44
Média (kg ha <sup>-1</sup> )		2,0711	11,245	5,510	2,133	1,538	15,071
CV %		25,56	5,04	6,17	17,61	21,34	3,03

<sup>ns</sup> Não-significativo, \* e \*\* Significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente, pelo Skott-Knott.

**Tabela 2.** Resumo da análise de variância para os macronutrientes avaliados no grão de milho submetido a fontes e doses de enxofre.

		P	K	Ca	Mg	S	N
Fonte de variação	GL	MS	MS	MS	MS	MS	MS
Bloco	3	0,193 <sup>ns</sup>	0,082 <sup>ns</sup>	0,056 <sup>ns</sup>	0,446*	0,031 <sup>ns</sup>	0,499 <sup>ns</sup>
Fontes de S	2	15,705**	183,849**	1,090**	9,371**	0,983**	19,667**
Doses de S	3	2,238**	188,076**	0,019 <sup>ns</sup>	0,083 <sup>ns</sup>	0,065*	11,668**
Fontes*Doses	6	1,622**	31,076**	0,022 <sup>ns</sup>	0,225 <sup>ns</sup>	0,271**	17,032**
Adicional*Fatorial	1	0,033 <sup>ns</sup>	256,538**	3,026**	0,546*	2,027**	
Resíduo	36	0,208	0,328	0,040	0,201	0,048	1,724
Total	51	1,097	27,195	0,137	0,578	0,150	254,43
Média (kg ha <sup>-1</sup> )		3,559	18,785	2,814	2,133	1,306	24,713
CV %		12,84	3,05	7,17	17,61	16,81	5,31

<sup>ns</sup> Não-significativo, \* e \*\* Significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente, pelo Skott-Knott.

**Tabela 3.** Resumo da análise de variância para os macronutrientes e fatores avaliados no solo na camada de 0-20 cm submetido a fontes e doses de enxofre.

		PhH2O	P	K	Ca	Mg	S	MO	Prema.
Fonte de variação	GL		MS	MS	MS	MS	MS	MS	
Bloco	3	0,091 <sup>ns</sup>	3,098 <sup>ns</sup>	1,717 <sup>**</sup>	0,378 <sup>*</sup>	0,033 <sup>ns</sup>	0,102 <sup>ns</sup>	0,259 <sup>ns</sup>	0,605
Fontes de S	2	0,067 <sup>ns</sup>	212,30 <sup>**</sup>	1192,44 <sup>**</sup>	0,369 <sup>ns</sup>	0,061 <sup>ns</sup>	0,155 <sup>ns</sup>	3,200 <sup>*</sup>	28,55 <sup>**</sup>
Doses de S	3	0,081 <sup>ns</sup>	41,707 <sup>**</sup>	140,771 <sup>*</sup>	1,104 <sup>**</sup>	0,042 <sup>ns</sup>	0,098	13,164 <sup>**</sup>	25,50 <sup>**</sup>
Fontes*Doses	6	0,029 <sup>ns</sup>	43,843 <sup>**</sup>	88,736 <sup>**</sup>	0,386 <sup>**</sup>	0,041 <sup>ns</sup>	0,540 <sup>**</sup>	6,980 <sup>**</sup>	20,12 <sup>**</sup>
Adi.*Fatorial	1	0,319 <sup>ns</sup>	250,420 <sup>**</sup>	992,275 <sup>*</sup>	0,455 <sup>ns</sup>	0,009 <sup>ns</sup>	1,057 <sup>**</sup>	0,069 <sup>ns</sup>	
Resíduo	36	0,160	7,306	0,535	0,130	0,033	0,098	0,744	3,205
Total	51	0,135	28,187	85,418	0,248	0,035	0,177	2,263	404,9
Média (kg ha <sup>-1</sup> )		5,663	37,001	47,83	2,064	0,340	0,920	14,614	46,353
CV %		7,08	7,31	1,53	17,48	52,73	34,09	5,90	3,86

<sup>ns</sup> Não-significativo, \* e \*\* Significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente, pelo Skott-Knott.

**Tabela 4.** Resumo da análise de variância para os macronutrientes e fatores avaliados no solo na camada de 20-40 cm submetido a fontes e doses de enxofre.

		PhH2O	P	K	Ca	Mg	S	MO	Prema.
Fonte de variação	GL		MS	MS	MS	MS	MS	MS	
Bloco	3	0,003	1,007	0,455	0,134		0,417	0,490	0,378
Fontes de S	2	0,001	9,922 <sup>**</sup>	505,79 <sup>**</sup>	0,590 <sup>*</sup>		10,296 <sup>**</sup>	1,232	41,444 <sup>**</sup>
Doses de S	3	0,055	39,101 <sup>**</sup>	61,733 <sup>**</sup>	0,098		1,447 <sup>**</sup>	0,101	14,331 <sup>**</sup>
Fontes*Doses	6	0,013	27,727 <sup>**</sup>	15,157 <sup>**</sup>	0,205 <sup>**</sup>		4,026 <sup>**</sup>	1,667	56,616 <sup>**</sup>
Adi.*Fatorial	1	0,010	89,029 <sup>**</sup>	38,332	0,009		0,271	0,617	
Resíduo	36	0,043	0,847	0,468	0,047		0,224	0,437	0,738
Total	51	0,038	0,354	26,358	0,094		1,150	0,600	492,480
Média (kg ha <sup>-1</sup> )		4,765	26,608	30,389	0,625		4,774	6,362	1,87
CV %		4,52	3,46	2,25	34,86		9,92	10,39	45,892

<sup>ns</sup> Não-significativo, \* e \*\* Significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente, pelo Skott-Knott.