



Silene Ceratti

**VIABILIDADE TÉCNICA ECONÔMICA DA ADUBAÇÃO COM
ENXOFRE NA CULTURA DA SOJA**

Dissertação de Mestrado

Cruz Alta- RS, 2018.

Silene Ceratti

**VIABILIDADE TÉCNICA ECONÔMICA DA ADUBAÇÃO COM
ENXOFRE NA CULTURA DA SOJA**

Dissertação submetida ao Mestrado Profissional em Desenvolvimento Rural da Universidade de Cruz Alta, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Desenvolvimento Rural.

Orientador. Prof^o. Dr. Eng. Agr. Jackson Ernani Fiorin

Cruz Alta- RS, 20 de novembro de 2018

Universidade de Cruz Alta – UNICRUZ
Vice-Reitoria de Pós-Graduação, Pesquisa e Extensão
Mestrado Profissional em Desenvolvimento Rural

VIABILIDADE TÉCNICA ECONÔMICA DA ADUBAÇÃO COM ENXOFRE NA CULTURA DA SOJA

Elaborado por

Silene Ceratti

Como requisito parcial para obtenção do Título de
Mestre em Desenvolvimento Rural

Banca examinadora:

Prof. Dr. Jackson Ernani Fiorin
Universidade de Cruz Alta – UNICRUZ

Prof. Dr. Vitor Cauduro Girardello
Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai - URI

Prof. Dr. Rafael Pivotto Bortolotto
Universidade de Cruz Alta - UNICRUZ

Cruz Alta - RS, 20 de novembro de 2018

AGRADECIMENTOS

A Deus.

Aos meus pais Vilerson e Edi Lucia, pelo apoio, carinho e compreensão, sem os quais jamais teria conseguido, meus exemplos e minha força para seguir na busca de novos desafios.

Ao meu noivo Luan Prochnow, pelo incentivo, amor e paciência.

Aos meus irmãos Silvester e Soli Luís, as minhas cunhadas Gabriela e Maria Onira e meus sobrinhos Bruna, Helena e Samuel que sempre me apoiaram na busca desse sonho, souberam entender minha ausências.

À Universidade de Cruz Alta, pela contribuição à minha formação como Mestre em Desenvolvimento Rural.

Ao professor Jackson pela atenção apoio na construção desse trabalho.

Aos gestores da 3tentos Agroindustrial S.A, empresa onde trabalho, a qual acordamos e assim pude cursar o mestrado.

RESUMO

VIABILIDADE TÉCNICA ECONÔMICA DA ADUBAÇÃO COM ENXOFRE NA CULTURA DA SOJA

Autor: Silene Ceratti

Orientador: Profº. Eng. Agr. Dr. Jackson Ernani Fiorin

A busca por altas produtividades nos últimos anos tem estimulado a prática da adubação equilibrada, atentando para elementos essenciais, bem como a sua disponibilidade. O Enxofre (S) é, provavelmente, o macronutriente menos empregado nas adubações. A disponibilidade deste nutriente varia amplamente com as condições de solo, clima e cultivo. Existe a necessidade de se entender melhor a dinâmica do S no solo e a resposta das culturas. Esse estudo teve o objetivo de realizar o diagnóstico dos teores de S dos solos de diferentes regiões do Estado do RS, avaliar a resposta em produtividade e incrementos dos teores de S no solo a diferentes fontes e doses de fertilizantes contendo S. O diagnóstico foi realizado utilizando-se de 197.586 análises, realizadas no período de 2001 a 2016 pelo Laboratório de Análises de Solos da CCGL. Os resultados foram sistematizados utilizando-se de planilha e calculada a distribuição de frequência das análises dos teores de S, considerando as faixas de <5,0; 5,1 a 10; 10,1 a 15; 15,1 a 20 e > 20 mg dm⁻³. O trabalho de campo foi conduzido em duas áreas no município de Cruz Alta, RS, sendo uma com textura argilosa e outra franco argilosa. Os tratamentos foram constituídos de dois fatores: Fator A (Fonte de S): Elementar (S-S^o) e Sulfato (S-SO₄⁻²); Fator B (doses de S): 0, 75, 150, 225 e 300 kg ha⁻¹ de S, utilizando-se, respectivamente, S90 (90% de S-S^o) e Gesso agrícola (15% de S-SO₄⁻²). O delineamento experimental foi o bi-fatorial (2x5), no esquema de parcelas subdivididas, em blocos ao acaso, com 4 repetições. Foi avaliada a produtividade de grãos numa sequência de 3 cultivos: soja 2016/17, trigo 2017 e soja 2017/18. Os incrementos dos teores de S no solo foram avaliados através da coleta de amostra de solo aos 6 e 18 meses, nas camadas 0 a 20, 20 à 40 e 40 à 60 cm de profundidade. Existe alta frequência de baixos teores de S no solo, na média de 59% das análises realizadas de 2001 a 2016, demonstrando alta probabilidade de respostas à aplicação de fertilizantes contendo S em diferentes regiões do Estado do RS. Houve resposta econômica à adubação sulfatada com doses de MEE de 97 e 67 kg ha⁻¹, respectivamente para S na forma de sulfato e elementar. Houve incrementos dos teores de S do solo na camada de 0 à 20 cm aos 6 meses após a aplicação, necessitando de 26 e 12 kg ha⁻¹ de S na forma de sulfato e de 50 e 26 kg ha⁻¹ de S na forma elementar, respectivamente para o solo argiloso e franco argiloso, para elevar 1 mg dm⁻³ de S na análise do solo.

Palavras-Chave: Adubação sulfatada, enxofre elementar, diagnóstico da fertilidade, gesso.

ABSTRACT

Author: Silene Ceratti

Advisor: Prof^o. Eng. Agr. Dr. Jackson Ernani Fiorin

The investigation for high performance in recent years has promoted the practice of balanced fertilization, taking into account essential elements as well as their availability. Sulfur (S) is probably the macronutrient least used in fertilization. The availability of this nutrient varies widely with soil, climate and crop conditions. There is a need to better understand S soil dynamics and crop response. The objective of this study was to diagnose S levels of soils from different regions of the State of Rio Grande do Sul, to evaluate the response in productivity and increase of S soil contents to different sources and doses of fertilizers containing S. The diagnosis was made using 197,586 analyzes carried out in the period from 2001 to 2016 by the Laboratory of Soil Analysis of the CCGL. The results were systematized using a spreadsheet and the frequency distribution of the analyzes of S contents was calculated considering the ranges of <5.0; 5.1 to 10; 10.1 to 15; 15.1 to 20 and > 20 mg dm⁻³. The field work was conducted in two areas in the city of Cruz Alta, RS, one of which is clayey and one loamy. The treatments were composed of two factors: Factor A (Source of S): Elementary (S-S^o) and Sulphate (S-SO₄-2); (S-doses): 0, 75, 150, 225 and 300 kg ha⁻¹ of S, respectively using S90 (90% S-S^o) and Agricultural gypsum (15% S-SO₄-2). The experimental design was bi-factorial (2x5), in the subdivided plots scheme, in randomized blocks, with 4 replicates. Grain yield was evaluated in a sequence of 3 crops: 2016/17 soybean, 2017 wheat and 2017/18 soybean. The increment of S soil contents was evaluated through soil sample collection at 6 and 18 months, in layers 0 to 20, 20 to 40 and 40 to 60 cm in depth. There is a high frequency of low levels of S in the soil, in the average of 59% of the analyzes performed from 2001 to 2016, demonstrating a high probability of responses to the application of fertilizers containing S in different regions of the RS State. There was an economic response to sulphate fertilization with MEE doses of 97 and 67 kg ha⁻¹, respectively for S as sulfate and elemental. There were increases of soil S contents in the 0 to 20 cm layer at 6 months after application, requiring 26 and 12 kg ha⁻¹ of S as sulphate and 50 and 26 kg ha⁻¹ of S in the form elemental, respectively for clayey and loamy soil, to raise 1 mg dm⁻³ of S in soil analysis.

Key words: Sulphated fertilization, elemental sulfur, fertility diagnosis, gypsum.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Precipitação pluviométrica diária e acumulada no período experimental da pesquisa com enxofre em Soja 2016/2017. UNICRUZ, Cruz Alta, RS, 2017..	31
Figura 2	Precipitação pluvial diária e acumulada no período experimental da pesquisa com enxofre em trigo 2017. UNICRUZ, Cruz Alta, RS, 2017.....	32
Figura 3	Precipitação pluvial diária e acumulada no período experimental da pesquisa com enxofre em Soja 2017/2018. UNICRUZ, Cruz Alta, RS, 2018.....	33
Figura 4	Distribuição de frequência das amostra nos diferentes teores de enxofre período de 2001-2006... ..	35
Figura 5	Distribuição de frequência das amostras nos diferentes teores de enxofre período de 2007-2012.....	36
Figura 6	Distribuição de frequência das amostras nos diferentes teores de enxofre período de 2013-2016.....	36
Figura 7	Produtividade de grãos de trigo 2017 (A) em resposta à diferentes fontes e doses de fertilizantes contendo enxofre em solo argiloso. Cruz Alta, RS. 2018	39
Figura 8	Produtividade de grãos de soja 2017/2018 (B) em resposta a diferentes fontes e doses de fertilizantes contendo enxofre em solo argiloso. Cruz Alta, RS. 2018.....	39
Figura 9	Produtividade de grãos acumulada (C) em resposta à diferentes fontes e doses de fertilizantes contendo enxofre em solo argiloso. Cruz Alta, RS. 2018.....	40
Figura 10	Produtividade de grãos de trigo 2017 (A) em resposta à diferentes fontes e doses de fertilizantes contendo enxofre em solo franco argiloso. Cruz Alta, RS. 2018.....	40
Figura 11	Produtividade de grãos de soja 2017/2018 (B) em resposta à diferentes fontes e doses de fertilizantes contendo enxofre em solo franco argiloso. Cruz Alta, RS. 2018.....	40
Figura 12	Produtividade de grãos acumulada (C) em resposta à diferentes fontes e doses de fertilizantes contendo enxofre em solo franco argiloso. Cruz Alta, RS. 2018.....	41
Figura 13	Incremento dos teores de enxofre em solo argiloso (A) 0-20cm, (B) 20-40cm, (C) 40-60cm após corridos 6 meses de instalação do experimento.....	47
Figura 14	Incremento dos teores de enxofre em solo franco argiloso (A) 0-20cm, (B) 20-40cm, (C) 40-60cm após corridos 6 meses de instalação do experimento...	48
Figura 15	Incremento dos teores de enxofre em solo argiloso (A) 0-20cm, (B) 20-40cm, (C) 40-60cm após corridos 18 meses de instalação do experimento.....	49
Figura 16	Incremento dos teores de enxofre em solo franco argiloso (A) 0-20cm, (B) 20-40cm, (C) 40-60cm após corridos 18 meses de instalação do experimento.	50

Figura 17	Aumento dos teores de enxofre na fonte de sulfato, após 6 meses de 0-20 cm, para os dois teores tipos de solo Argila 50 a 55% e Argila 30 a 35%.....	51
Figura 18	Aumento dos teores de enxofre na fonte de elementar, após 6 meses de 0-20 cm, para os dois teores tipos de solo Argila 50 a 55% e Argila 30 a 35%.....	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Quantidade absorvida e exportação de nutrientes pela cultura da soja.....	18
Tabela 2	Quantidade de amostras de solo realizada em três períodos pelo Laboratório de solos da CCGL TEC. Com leitura do Teor de Enxofre Extraível.....	29
Tabela 3	Análise granulométrica do solo das áreas experimentais.....	30
Tabela 4	Características químicas na camada de 0 a 20, 20 a 40 e 40 a 60 cm de profundidade, na condição inicial das áreas experimentais da pesquisa com soja safra 2016/2017. Cruz Alta, RS. 2017.....	30
Tabela 5	– Curva de melhor ajuste para produtividades de grãos, dose de máxima eficiência técnica (MET), eficiência de uso de enxofre (EUS) e incremento de produtividade na MET das culturas de soja 16/17 (1º cultivo), trigo 2017 (2º cultivo), soja 2017/18 (3º cultivo) e produtividade acumulada em resposta à diferentes fontes e doses de fertilizantes contendo enxofre em solo argiloso e franco argiloso. Cruz Alta, RS. 2018.....	41
Tabela 6	Cenário de resposta econômica da adubação com diferentes fontes de fertilizantes contendo enxofre num período de 3 cultivos (soja-trigo-soja) em solo argiloso e franco argiloso. Cruz Alta, RS. 2018.....	43

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 Hipóteses	13
1.2. Objetivos	13
1.2.1 Objetivos Gerais.....	13
1.2.2 Objetivos Específicos.....	14
2 REFERENCIAL TEORICO	15
2.1 A importância da cultura da soja	15
2.2 Exigências nutricionais da cultura da soja	16
2.3 Importância do Enxofre	19
2.3.1 No solo.....	19
2.3.2 Na planta.....	21
2.4 Resposta da soja a adubação com enxofre	22
2.5 Fontes de enxofre	24
2.5.1 Gesso.....	25
2.5.2 Enxofre elementar.....	26
3 METODOLOGIA).....	29
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	35
4.1 Diagnóstico dos Teores de Enxofre do Solo	35
4.2 Produtividade de Grãos	38
4.3 Incremento dos Teores de Enxofre no Solo	45
5 CONCLUSÕES	55
REFERÊNCIAS	56
APÊNDICES	62

1 INTRODUÇÃO

A soja é a principal oleaginosa produzida no mundo, possuindo grande importância econômica. O Brasil é um dos grandes produtores mundiais do grão sendo o segundo maior produtor mundial e o segundo em volume de exportação de soja. Na safra 2017 foram colhidos 118,9 milhões de toneladas de soja, em uma área plantada 35,151 milhões de hectares e a produtividade média foi de 3.382 kg ha⁻¹ (CONAB, 2018).

A busca por alta produtividade tem sido amplamente discutida, bem como a influência da genética, do clima, das condições nutricionais e de manejo da cultura. Há que considerar que existem fatores controláveis e outros não controláveis. Embora todos sejam importantes, alguns fatores são responsáveis pela construção do potencial produtivo, entretanto outros, apenas mantem o potencial produtivo definido pelo arranjo dos demais.

A adubação está entre os fatores de fundamental importância para incrementar a produtividade, pois garante os nutrientes necessários para que a planta tenha um bom desempenho. O processo de diagnóstico da fertilidade do solo que se inicia com a amostragem e análise do solo, possibilidade identificar as reais necessidades da cultura e realizar recomendações de calagem e/ou adubação a fim de garantir altas produtividades.

Entretanto, nas recomendações da cultura da soja, historicamente sempre deu-se maior importância à correção de acidez, que também adiciona grandes quantidades de cálcio e magnésio, e a adubação com fósforo e potássio. Os demais nutrientes, em especial ao enxofre (S), apesar de serem essenciais, sempre tiveram importância secundária, atribuído à ausência de resposta baseados em estudos mais antigos, alegando que sua reposição oriunda da matéria orgânica do solo seria suficiente para os baixos índices produtivos da época.

O S é um elemento essencial, considerado macronutriente secundário e sendo exigido em quantidades relativamente elevadas pelas culturas, semelhante às quantidades de fósforo. Depois de ser absorvido, na forma de sulfato, ele é reduzido e incorporado em aminoácidos que são redistribuídos para as partes da planta em crescimento. Além da função estrutural das proteínas, também é constituinte de enzimas e vitaminas, atuante em diferentes processos fisiológicos, sendo necessário para a fotossíntese e para o processo de fixação do nitrogênio. Também é necessário na formação da clorofila, apesar de não ser um constituinte dela, melhoria da qualidade dos cereais para o beneficiamento e o processamento como

alimento, teor de óleo das sementes de oleaginosas como a soja e aumenta a resistência à deficiência hídrica e controla certas doenças transmitidas através do solo.

A manutenção de teores adequados de matéria orgânica garante o suprimento gradual de S às plantas, através da sua mineralização. Entretanto, o uso intensivo do solo resulta na diminuição nos teor de matéria orgânica, associado ao uso de corretivos em superfície, aumenta a lixiviação de S, devido à sua grande mobilidade, provocando seu acúmulo em camadas mais profundas deixando sua disponibilidade comprometida para a cultura. Isso tem sido percebido pela diminuição dos teores de S nas análises de solos nos últimos anos.

Além desses fatores o S muitas vezes é ignorado, sendo provavelmente, o macronutriente menos empregado nas adubações, dando-se prioridade a fertilizantes mais concentrados em nitrogênio, fósforo e potássio com ausência de S. O S por sua essencialidade e pelas limitações que o solo vem apresentando em fornecê-lo para as culturas, aliado às altas exportações deste elemento pelas colheitas, fatores que reduzem a disponibilidade de S no solo, aumenta-se a probabilidade de resposta das culturas agrícolas à adubação sulfatada.

Entre as fontes de fertilizantes de S comercializadas e disponíveis no mercado brasileiro existem duas formas de S, na forma de sulfato ($S-SO_4^{-2}$) e o S elementar ($S-S^0$). A forma de sulfato é prontamente disponível para ser absorvido e incorporado nos tecidos das plantas. O S elementar precisa ser oxidado no solo por microrganismos, principalmente do gênero *Thiobacillus*, transformando na forma de $S-SO_4^{-2}$, para ser disponibilizado para as plantas.

A recomendação de adubação e de calagem baseia-se principalmente na análise de solo para a avaliação das necessidades de corretivos da acidez e de fertilizantes. Com relação ao S ainda não existe uma referência no que diz respeito à dose ideal para as culturas. Neste sentido, há carência de pesquisas que abordem a utilização do S na cultura da soja.

A disponibilidade de S varia muito com os níveis de matéria orgânica e argila do solo. Existe a necessidade de se entender melhor a dinâmica do S no solo, a situação da fertilidade do solo em relação aos teores de S na região produtora e a resposta das culturas a esse nutriente.

Em vista da importância da cultura da soja na cadeia produtiva de grãos no RS, a Universidade de Cruz Alta (UNICRUZ) em parceria com a Cooperativa Central Gaúcha Ltda (CCGL), estão empenhadas em buscar resposta para um melhor entendimento do manejo da fertilidade do solo e nutrição das plantas mais equilibrada, permitindo o uso mais eficiente desses fatores na busca de maiores índices de produção da cultura da soja.

Todavia, o uso sustentável dos recursos torna-se cada vez mais importante quando se tem por referência o aumento da população mundial e como consequência a demanda por alimentos. Por isso, em âmbito regional, devido à carência de estudos específicos, tornam-se pertinentes novas pesquisas que enfoquem o entendimento da situação da fertilidade do solo e as respostas da adubação com S na cultura da soja, possibilitando tornar estes resultados em recomendações aplicáveis para os produtores, transformando o objetivo deste trabalho em algo realmente relevante à produção de soja no RS. Dessa forma, o Mestrado em Desenvolvimento Rural da UNICRUZ busca diminuir a distância entre as demandas da sociedade e o centro acadêmico, desenvolvendo projetos que visam à sustentabilidade e o crescimento profissional do mestrando, assim promovendo e fomentando o conhecimento capaz de transformar a realidade.

1.1 Hipóteses

- Os teores de enxofre no solo encontram-se abaixo do adequado para as culturas.
- Há resposta da cultura da soja a aplicação de fertilizantes contendo enxofre.
- O uso fertilizantes contendo enxofre nas formas de sulfato e elementar é similar na melhoria dos teores desse nutriente no solo e na produtividade da soja.

1.2. Objetivos

1.2.1 Objetivos Gerais

- Realizar o diagnóstico da situação dos teores de enxofre nos solos da região e avaliar a resposta da cultura da soja a diferentes fontes e doses de fertilizantes contendo enxofre.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Diagnosticar a situação dos teores de enxofre no solo através do levantamento em banco de dados de análises de solo da região.
- Avaliar a produtividade da soja em resposta a doses enxofre elementar e gesso agrícola.
- Avaliar o incremento dos teores de enxofre no solo após a utilização de fertilizante contendo enxofre nas formas de sulfato e elementar.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 A importância da cultura da soja

No Brasil, a partir dos anos 60, a soja começou a crescer em importância econômica, porém se concentrando na região Centro Sul. Nos dias atuais a soja é cultivada em todas as regiões do país, desde a década de 80, em que a cultura teve uma expressiva expansão com o seu uso e a abertura de terras no cerrado brasileiro.

A implantação de programas de melhoramento de soja no Brasil possibilitou o avanço da cultura para as regiões de baixas latitudes, através do desenvolvimento de cultivares mais adaptados por meio da incorporação de genes, conferindo a características específicas através de programas de melhoramento, com alta estabilidade e adaptabilidade, os quais apresentam caracteres agronômicos desejáveis e alta produtividade de grãos para as regiões produtoras no território brasileiro (FREITAS, 2011).

De acordo com a Revista Plantar (2011) “o setor da soja no Brasil, até os dias atuais é um dos mais estruturados e desenvolvidos da agricultura, apresentando alta suficiência dentro e fora da porteira”. Os aspectos culturais da soja é um cultivo anual, que constituído de um ciclo variado de 100 a 150 dias para cada tipo de cultivar que contém características morfológicas distintas. A cultura se faz por algumas exigências hídricas umidade do solo que variam de 50-85% dependendo do seu estágio de desenvolvimento, com 400 a 850mm/ciclo. Atinge o máximo de exigência hídrica na floração e enchimento dos grãos (7 a 8 mm dia⁻¹). O estresse hídrico neste período pode ocasionar problemas fisiológicos graves que ocasionam queda prematura de folhas e conseqüente redução de produtividade.

Avanços científicos em tecnologias para manejo de solos, com técnicas de correção da acidez, o processo de inoculação das sementes para fixação biológica do nitrogênio (N) e a adubação balanceada com macronutrientes e micronutrientes, permitiram a cultura expressar a sua potencialidade nas diversas condições edafoclimáticas do território brasileiro. Outro grande fator que contribuiu para a expansão da soja no Brasil foi a implantação do manejo integrado de pragas, controlando os principais insetos causadores de danos econômicos na cultura. Nesse sentido, merece destaque o início do uso de fungicidas a partir da década de

90 para o controle das principais doenças. Essas duas tecnologias ganharam importância desde a implantação da cultura através do tratamento de sementes.

O setor de máquinas e implementos agrícolas também avançou de forma expressiva nesse período, promovendo a modernização e aperfeiçoamento das operações de cultivo, tornando-as mais eficientes. Tecnologias incorporadas como o Sistema Plantio Direto (SPD), que quando bem administrado, gera produtividade e rentabilidade de forma sustentável, torna a cultura menos vulnerável às condições climáticas, além de favorecer a qualidade do solo, em consequência da inexistência de revolvimento e mantendo as plantas e os restos vegetais sobre a superfície. Entre os aspectos importantes do plantio direto, destaca-se o seu vínculo com a matéria orgânica do solo. Várias propriedades do solo, tanto físicas quanto químicas e biológicas são influenciadas pela matéria orgânica (PRIMIERY; SANTOS, 2017). Quando aplicado o SPD, ocorre o acúmulo dessa MO que provoca modificações positivas no ambiente do solo, salientando a sua importância.

Se analisarmos a perspectiva sobre o dinâmico agronegócio da soja brasileira e tomarmos como referência a realidade atual, podemos considerar alguns pontos como o crescimento do consumo e conseqüentemente a demanda por soja no mundo, pois a população humana continuou aumentando, os usos industriais da soja (biodiesel, tintas, vernizes, entre outros) aumentará a demanda do produto, o consumo interno de soja deverá crescer, estimulado por políticas oficiais destinadas a aproveitar o enorme potencial produtivo do País, que está excessivamente dependente do mercado externo e a produção dos nossos principais concorrentes (EUA, Argentina, Índia e China) tenderá a estabilizar-se por falta de áreas disponíveis para expansão em seus territórios. Essas considerações fazem acreditar positivamente no futuro da produção brasileira de soja, pois dentre os grandes produtores mundiais da oleaginosa, o Brasil figura como o país que apresenta as melhores condições para expandir a produção e prover o esperado aumento da demanda mundial.

2.2 Exigências nutricionais da cultura da soja

A recomendação correta de fertilizantes é fundamental para o suprimento adequado dos nutrientes. Esta se baseia na fertilidade do solo, através da realização da análise de solo, que identifica o potencial de resposta aos nutrientes para cada ecossistema, por um sistema de classes de interpretação da disponibilidade destes nutrientes para as plantas. Nos solos com teores baixos ou muito baixos, é necessária a adubação de correção para elevar a

disponibilidade, enquanto que nos solos com teor médio a alto, devem ser aplicadas apenas as quantidades suficientes para repor as perdas com a exportação dos grãos (EMBRAPA, 2017).

Referente à nutrição da soja, a absorção de nutrientes minerais, é influenciada pelas condições climáticas e térmicas, pelos teores de nutrientes contidos no solo juntamente com seus tratos culturais (BORKERT et al., 1994). Os desarranjos no metabolismo das plantas causadas pela deficiência de nutrientes se manifestam em anomalias visíveis, sendo possível visualizar sintomas específicos (ESPTEIN; BLOOM, 2006).

Segundo Zambolim; Ventura; Junior (2012) todos os nutrientes são essenciais para as plantas, pois qualquer nutriente pode influenciar a sanidade da planta, tornando ela mais suscetível ou não para as doenças, ou seja, a nutrição da planta pode em certos momentos induzir a resistência ou a tolerância da planta às doenças que possam causar danos em função do seu balanço nutricional equilibrado.

Na cultura da soja a produtividade, a eficiência e a lucratividade são aspectos da maior relevância, além de que se deve sempre procurar a sustentabilidade dos processos produtivos. Nesse contexto, os fertilizantes, cuja importância é conhecida há décadas, representam um significativo percentual do custo de produção da soja. Segundo dados da EMBRAPA (2017), este percentual é da ordem de 20 a 30 % dependendo do nível tecnológico do produtor.

Segundo os levantamentos das safras brasileiras de grãos pela Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2018), a colheita da soja alcançou incremento na produtividade média nacional representando um aumento de 5,5% em relação a safras anteriores. Uma das explicações para esse aumento está na intensificação do manejo nutricional da lavoura. De acordo com Domingos; Lima; Braccini (2015), a exigência nutricional da soja e o potencial de exportação da cultura são características determinadas por fatores genéticos, porém influenciados por fatores climáticos, pela fertilidade do solo e pelo manejo cultural. Assim, na Tabela 1 podem-se visualizar as quantidades de nutrientes extraídas e exportadas pela cultura da soja, para cada tonelada de grãos produzida. A absorção de nutrientes pela soja, medida pela quantidade acumulada nas folhas e caules da planta, é crescente até atingir um ponto de máximo acúmulo. A partir deste momento o acúmulo é decrescente, devido à translocação dos nutrientes para os grãos em formação (BARTH et al, 2018).

Tabela 1. Quantidade absorvida e exportação de nutrientes pela cultura da soja.

Parte da planta	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Ca	Mg	S
	kg/ toneladas de grãos					
Grãos	51	10	20	3	2	5,4
Restos culturais	32	5,4	18	9,2	4,7	10
Total	83	15,4	38	12,2	6,7	15,4
Exportação (%)	61	65	53	25	30	35

Fonte: Adaptada de EMBRAPA

O período em que os nutrientes são absorvidos em maior quantidade, corresponde à fase do desenvolvimento da planta em que as exigências nutricionais são maiores. Este período vai de V2 (primeira folha trifoliada completamente desenvolvida) até R5 (início de enchimento de grãos). A velocidade de absorção aumenta durante a floração e início de enchimento dos grãos. Aliado ao aumento da velocidade de absorção, verifica-se também uma alta taxa de translocação na planta ao longo desse período (EMBRAPA, 2017).

Os nutrientes apresentam diferenças nas suas funções como constituintes metabólicos e estruturais nos órgãos vegetais. Isto determina uma variação no grau de transporte e redistribuição dos nutrientes na planta (BARTH et al, 2018).

A disponibilidade de nutrientes deve estar sincronizada com o requerimento da cultura, em quantidade, forma e tempo. Um programa racional de adubação envolve algumas considerações como a diagnose da fertilidade do solo, necessidade nutricional da soja de acordo com a exportação de grãos estimada, as fontes dos nutrientes e sua disponibilidade e a forma que será manejada essa adubação (BARTH et al, 2018).

Os solos apresentam diferenças em sua capacidade no fornecimento de nutrientes, dependendo da quantidade de reservas totais, dinâmica de mobilização e fixação e da disponibilidade dos nutrientes para as raízes. Desse modo, é necessário quantificar, por meio de análises químicas, o potencial dos solos em fornecer os nutrientes e o estado nutricional das plantas, como instrumentos para o uso eficiente de corretivos e fertilizantes. Além destes fatos, é necessário também levar em consideração os diferentes esquemas de rotação e sucessão de culturas que apresentam diferenças nas exigências nutricionais e reciclagem dos nutrientes pelas diferentes componentes dos sistemas de produção utilizados nas propriedades agrícolas.

Quando o solo não se mostra apropriado para o cultivo da soja, apresentando falta de nutrientes requeridos, ou quando esses nutrientes são removidos pela cultura, surge à necessidade de realizar a adubação pelo emprego de fertilizantes (BLANCO, 2015).

Orientado pelos teores de nutrientes determinados na análise de solo e pelos objetivos de produtividade, deve-se determinar as recomendações de adubação.

O produtor sempre leva em consideração alguns parâmetros que caracterizam o solo como pH e matéria orgânica, além de alguns nutrientes essenciais que são comumente avaliados através da interpretação da análise de solo, os mais importantes historicamente dentro do desenvolvimento da agricultura sempre foram fósforo e potássio além de ser observada a relação cálcio/ magnésio, os demais como S, zinco, boro, cobre, manganês, ferro, entre outros. Apesar de serem essências sempre tiveram importância secundária nesse processo, raramente sendo discutidos e sua reposição julgada como desnecessária visto estudos mais antigos, os quais baseados nos índices de produtividade julgavam irrelevantes, alegando que sua reposição seria oriunda da matéria orgânica do solo, no caso do S, ou pôr os nutrientes estarem presentes no material de origem e formação do solo.

2.3 Importância do Enxofre

2.3.1 No solo

A fertilidade dos solos, a nutrição e adubação são componentes essenciais para a construção de um sistema de produção eficiente, as exigências da cultura da soja a adubação é alta. Tem-se como exemplo o adubo fosfatado simples como fonte de S quando adicionados ao solo, além do efeito imediato sobre a cultura que se segue à adubação, pode ter um efeito residual nos cultivos subsequentes. Outros fatores que podem alterar o efeito residual do S no solo, seriam doses e fontes de S, método de aplicação, manejo, temperatura, tipo de solo, tempo de aplicação e umidade do solo. Pois podem apresenta uma solubilização mais lenta, podendo aumentar gradativamente a disponibilidade do mesmo, a eficiência desse nutriente no solo é muito variável (LARA et al., 2017).

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 ou orgânicos. Por outro lado, as saídas deste elemento estão relacionadas às exportações pelas culturas, à lixiviação, a erosão e a emissão de gases sulfurados (OSORIO-FILHO, 2006).

Os solos brasileiros são deficientes em S, visto que suas concentrações podem variar de 0,1% em solos minerais até 1% em solos orgânicos, demonstrando que a maior parte deste

encontra-se no solo está associada com a presença de compostos orgânicos, implicando também na importância dos processos microbiológicos nos solos para a disponibilização desse nutriente as plantas (PEREIRA et al, 2016). Para maximizar a conversão do nutriente S aplicado em adubações, é preciso atender em termos quantitativos, todos os estádios de crescimento e desenvolvimento da planta, para que possa atingir a produção máxima esperada para cada cultura, ou seja, atender às exigências nutricionais específicas de cada cultura a esse nutriente.

O S orgânico é gradualmente mineralizado a sulfato (SO_4^{-2}) pelo fato da fração orgânica deste nutriente ser a predominante, a mineralização e imobilização regulam o ciclo no solo e controlam a disponibilidade de S às plantas (NZIGUHEBA et al., 2005), dessa forma, o armazenamento de S orgânico significa suprimento constante deste elemento às plantas e para isso, a manutenção de teores adequados de matéria orgânica no solo é fundamental.

Os diferentes tipos de solos tem influência na dinâmica do S, os argilosos e com teores elevados de óxidos de ferro apresentam alta capacidade de retenção de sulfato, tornando a sua movimentação no perfil mais lenta. Em solos arenosos ou poucos intemperizados, SO_4^{-2} tende a deslocar-se mais rapidamente para os horizontes subsuperficiais, ou mesmo, sair do sistema solo por lixiviação. Geralmente, são encontrados teores mais elevados de SO_4^{-2} nos horizontes subsuperficiais, com maior quantidade de colóides inorgânicos, em relação à superfície. A magnitude dessas diferenças é aumentada quando o solo recebe aplicação de calcário ou fosfatos Caires & Fonseca (2000).

No Rio Grande do Sul, com o advento do sistema plantio direto, a transformação de áreas de campos nativos para sistemas de produção de grãos é geralmente acompanhada de aplicações de calcário sem incorporação. Essa prática é defendida por ser mais econômica e por reduzir os impactos negativos causados pelo revolvimento no solo. Todavia, o calcário, cuja mobilidade é baixa, promove a dessorção dos nutrientes aniônicos, entre eles o S, na camada superficial. De imediato, ocorre o aumento da disponibilidade destes elementos para as plantas. Porém, a infiltração de água promove a movimentação destes elementos para as camadas subsuperficiais, reduzindo, portanto, a disponibilidade na camada superficial com o tempo.

Para alcançarem esta região de acúmulo de nutrientes, as raízes precisam crescer sem impedimentos físicos ou químicos. Se o solo apresenta teores elevados de alumínio, a calagem superficial não irá neutralizar este elemento tóxico na subsuperfície, e as raízes não alcançarão os nutrientes oriundos da superfície (OSORIO-FILHO, 2006). Com a

concentração das raízes na superfície do solo, ao longo dos cultivos, poderão surgir problemas de deficiência de S, assim como baixa resistência das culturas aos períodos de seca. Por outro lado, em períodos de déficit hídrico, os ânions solúveis apresentam fluxo ascendente no perfil do solo em função do processo de evapotranspiração. Dessa maneira o SO_4^{-2} das camadas mais profundas poderá ascender para as regiões onde se concentram as raízes.

A lixiviação é tida como a principal forma de saída de SO_4^{-2} do sistema solo. Estudos do balanço de S no solo por Eriksen et al. (2000), mostraram que a saída de SO_4^{-2} do perfil do solo via lixiviação reduziu o teor de S no tecido das culturas. Estes autores também comentam da importância de plantas com elevada absorção de S, para o processo de ciclagem deste elemento no solo, o que diminui a probabilidade de lixiviação e aumenta a disponibilidade de sulfato para os cultivos subsequentes. Também são importantes para a ciclagem de S no solo, plantas de raízes agressivas e profundas, que disponibilizam para as culturas seguintes o S que até então estava em camadas mais profundas.

Dessa forma, o manejo da adubação, em relação às doses e aos modos de aplicação (sulcos, a lanço e parcelada), também deve ser considerado, devido ao alto potencial de perdas por lixiviação em alguns solos. A adubação da soja normalmente é realizada aplicando parte dos fertilizantes no sulco de semeadura e parte em cobertura. Porém, em algumas condições, existe a possibilidade de antecipação dessas adubações, aplicando a lanço, antes da semeadura. Outro aspecto que deve ser considerado é que a adubação tardia, em cobertura a lanço, em solos argilosos, pode não ser eficiente para a cultura. Sendo todos pontos a serem considerados no momento em que se define a adubação da cultura.

Para a análise de S recomenda-se coletar as amostras de solo de 0 a 20 cm quando em sistema de preparo convencional e sistema plantio direto em fase de implantação. Em situações de sistema plantio direto consolidado, a coleta deve ser realizada na profundidade de 0 a 10 cm, entretanto, também se recomenda considerar amostras coletadas na camada de 10 a 20 cm de profundidade (COMISSAO, 2016)

2.3.2 Na planta

As exigências de S pelas culturas variam muito de acordo com a espécie e com a produtividade esperada. No grupo das culturas de média/alta exigência incluem-se as leguminosas, que, de um modo geral, são mais exigentes que as gramíneas, em função de seu teor mais elevado de proteínas (ALVAREZ et al., 2007; RHEINHEIMER et al., 2005). Em

função disso, a soja é uma cultura exigente neste nutriente, e há possibilidade de resposta à adubação com S, sendo essencial para as plantas, considerado um macronutriente, e certamente o menos empregado em adubação para a cultura.

O S se aproxima funcionalmente do N. Embora a quantidade de S nas plantas seja menor que a quantidade encontrada de N, esses nutrientes compartilham grande versatilidade em reações de oxidação-redução, atributo esse que os torna fundamentais no metabolismo das plantas, além do mais, o S é constituinte de alguns aminoácidos e de várias coenzimas (MALAVOLTA; MORAES, 2007).

A absorção ocorre, predominantemente, na forma de sulfato SO_4^{-2} , podendo, também, ser absorvido como S orgânico, SO_2 (ar) e S molhável (defensivos) pelas folhas. Apresenta-se, em grande maioria na planta, sob a forma orgânica (cistina, cisteína, metionina, proteínas, glicosídeos e vitaminas). As assimilações de nitrogênio e enxofre são bem coordenadas, ou seja, a deficiência de um elemento reprime a via assimilatória do outro (EPSTEIN; BLOOM, 2006). É um nutriente com o transporte a longa distância ocorrendo, principalmente, pelo xilema e com baixa mobilidade no floema. Por isto, os primeiros sintomas de deficiência aparecem nas folhas novas, em forma de uma clorose uniforme, semelhante à deficiência de N (SFREDO; BORKERT, 2004). As folhas superiores, principalmente as mais novas, são os principais drenos fisiológicos do enxofre, de acordo com Silva et al. (2002).

2.4 Resposta da soja a adubação com enxofre

A necessidade de enxofre varia conforme a cultura e a produtividade esperada. A COMISSÃO... (2016) define três faixas de disponibilidade de enxofre: “baixo”, “médio” e “alto”, que correspondem respectivamente a teores de enxofre extraível $\leq 2 \text{ mg dm}^3$, entre 2,1 e $5,0 \text{ mg dm}^3$, e $> 5 \text{ mg dm}^3$. Contudo, para as leguminosas, brássicas e liliáceas, é preconizado o teor crítico de 10 mg dm^3 .

Nogueira e Melo (2003) avaliaram, em condições de campo, o efeito de doses de gesso agrícola nos teores foliares dos macronutrientes e na produtividade de grãos durante dois ciclos da cultura da soja. Não encontraram diferença na produtividade da soja e, à exceção do S no segundo ano, não alteraram o teor foliar de macronutrientes. Porém, atentam para um monitoramento do nutriente, devido ao seu rápido deslocamento no perfil do solo. Resultados semelhantes foram encontrados por Rheinheimer et al. (2005) no rendimento da cultura, com

aplicação de enxofre e os teores de sulfato num solo de textura superficial arenosa sob plantio direto. Em ambos, a justificativa baseou-se no teor do elemento no solo.

Vitti et al. (2007) buscaram avaliar a assimilação de enxofre elementar (S^0), aplicado nas folhas de soja, e sua eficiência comparada à adubação realizada diretamente ao solo, de acordo com a dose e a natureza da fonte do nutriente. A aplicação foliar apresentou assimilação pela planta, acarretando em um aumento no teor de proteína total na folha. Todas as fontes de S aplicadas às folhas aumentaram a produção de grãos, semelhantemente à aplicação ao solo. Neste caso, porém, utilizou-se um solo com teores baixos de S.

É perceptível que as informações sobre a resposta das culturas à fertilização com S são bastante discrepantes. 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 fertilizações com o nutriente, pode ser explicada de algumas 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 permitam a movimentação do SO_4^{-2} 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_4^{-2} em períodos de balanço hídrico negativo e a ciclagem deste elemento por plantas de cobertura de elevado crescimento radicular.

Osorio-Filho (2006) em estudos com ausência da aplicação de fertilizantes sulfatados, constatou que outras fontes de S podem estar atuando no fornecimento deste elemento para as plantas, podendo ser a decomposição dos resíduos orgânicos do solo, a dessorção de SO_4^{-2} dos colóides do solo, principalmente nas camadas subsuperficiais e a entrada de S atmosférico no sistema solo através da água da chuva ou da irrigação.

Após a cultura da soja, a disponibilidade de SO_4^{-2} no solo não sofreu alteração estatisticamente significativa em função das doses de S aplicadas, sendo de 5,7; 6,5 e 4,4 mg dm^{-3} para as profundidades de 0-10, 20-30 e 50-60 cm, respectivamente. Sendo que estes níveis estão aquém do nível de suficiência estabelecido para leguminosas. Na soja, outras fontes de S distintas da aplicação de fertilizantes sulfatados também atuaram, mascarando as repostas de produção de grãos. Percebe-se que, mesmo nos tratamentos sem aplicação de S, os valores de S disponível se mantêm no nível considerado médio pela Comissão (2016). Isso salienta a participação das reservas nativas de S, como o S presente na fração orgânica do solo

e a regulação da disponibilidade deste nutriente às plantas pelos processos de mineralização e imobilização, como discutido por Nziguheba et al. (2005).

2.5 Fontes de enxofre

As principais fontes de S utilizadas para suprir esse nutriente às plantas são o gesso agrícola, o sulfato de amônio e o superfosfato simples. Nestes fertilizantes, o S encontra-se na forma de SO_4^{-2} prontamente disponível à planta. Nos fertilizantes NPK, o teor de S varia, geralmente, entre 1% e 10%. Sendo que quanto menor for a concentração de nitrogênio, fósforo e potássio, maior a possibilidade de aumento do teor de S nas fórmulas. Fertilizantes com baixa concentração de NPK tendem a conter, em maior quantidade fósforo, como o superfosfato simples, o que aumenta o teor de S. Fórmulas mais concentradas em NPK tendem a conter como fontes de fósforo o monoamônio fosfato (MAP), diamônio fosfato (DAP) e o superfosfato triplo, que têm baixas concentrações de S (STIPP; CASARIN, 2010).

De acordo com Rajj et al. (1996) o sulfato de amônio (22 a 24% de enxofre), o superfosfato simples (10 a 12% de enxofre), gesso agrícola (15 a 18% de enxofre), o sulfato de potássio (15 a 17% de enxofre), o sulfato de potássio e magnésio (22 a 24% de enxofre), o sulfato de cálcio (13% de enxofre) são as fontes mais comuns desse nutriente.

A recomendação de adubação e de calagem baseia-se principalmente na análise de solo para a avaliação das necessidades de corretivos da acidez e de fertilizantes. Com relação ao S ainda não existe uma referência no que diz respeito à dose ideal para as culturas. De acordo com EMBRAPA (2003), a recomendação para a cultura da soja é de 15 kg para cada 1.000 kg de grãos produzidos. Neste sentido, há carência de pesquisas que abordem a utilização do S na cultura da soja.

Melo & Ferreira (1983) citaram que a elevação dos teores de SO_4^{-2} resultante da aplicação de superfosfato simples em Latossolo Roxo perdurou até 106 dias, diminuindo em seguida. Essas observações nos dizem a rapidez com que o íon sulfato é removido do perfil, e que mais atenção deve ser dada ao S, para que esse não venha a ser limitante às culturas, especialmente em solos com baixos teores de matéria orgânica, sua principal reserva.

Tiecher et al (2012) afirma que os níveis de suficiência de S no solo da camada de 0 - 10 cm, estabelecidos podem ser insuficientes para fins de predição da disponibilidade de S e da resposta das plantas à adição desse nutriente. Também observou que ao se cultivar espécies

com alta exigência em S, a aplicação do nutriente deve ser realizada concomitantemente à semeadura da cultura, com o intuito de manter a disponibilidade elevada de S no solo na zona de absorção das raízes pelo maior tempo possível durante o crescimento e o desenvolvimento das plantas.

As reservas mundiais de S são da ordem de cinco bilhões de toneladas, correspondentes ao S associado ao gás natural, petróleo, sulfetos metálicos de cobre, chumbo, zinco, molibdênio e ferro, na forma de elemento nativo nos depósitos em rochas sedimentares deformadas e vizinhas a domos salinos, em depósitos vulcânicos (resultantes da sublimação de vapores sulfurosos de origem magmática) e arenitos betuminosos (ALBUQUERQUE et al., 2011).

Atualmente, o S está se tornando um nutriente limitante para as produções das culturas, sendo que as principais razões para esse aumento da necessidade envolvem: maior produtividade das culturas, que requerem mais S; aumento do uso de fertilizantes concentrados que contém pouco ou nenhum S; redução das reservas de S do solo com as perdas da matéria orgânica devido à mineralização e à erosão (EMBRAPA, 2017).

2.5.1 Gesso

O gesso (CaSO_4) é obtido durante a produção do fertilizante superfosfato simples, em que a rocha fosfatada reage com ácido sulfúrico resultando no fertilizante e no resíduo sulfato de cálcio (gesso). Segundo dados conhecidos, pelo menos 85% do enxofre produzido mundialmente (nativo ou recuperado como co-produto) é usado como ácido sulfúrico, cujo emprego em fertilizantes é da ordem de 65%. Resulta que, do S pelo menos 55% destinam-se à indústria de fertilizantes (ALBUQUERQUE et al., 2011).

O gesso é um sal solúvel, recomendado para solos que apresentam baixos teores de cálcio, enxofre, e para neutralização do alumínio trocável no subsolo. A dissociação do gesso na solução do solo libera os íons Ca^{+2} e SO_4^{-2} . Aproximadamente 40% do total de cálcio solúvel está presente como sulfato de cálcio (CaSO_4) e, portanto, potencialmente móvel no solo. Por ter alta solubilidade no solo, o gesso fornece rapidamente o cálcio, que pode ser lixiviado em profundidade, melhorando a fertilidade e aumentando a exploração das raízes (ROSSETTO; SANTIAGO, 2011).

O gesso agrícola é uma importante fonte de enxofre às culturas. Nogueira e Melo (2003) verificaram que os teores de S disponível (SO_4^{-2}) na camada de 0 a 20 cm do solo

aumentaram com a aplicação de gesso, porém houve deslocamento desse S em profundidade no perfil, ficando pouco efeito residual nesta camada para os anos seguintes.

O gesso, dependendo da distância do local de produção, é fonte barata de S. Entretanto, a maioria dos trabalhos sobre seu uso visa à melhoria do ambiente radicular de subsuperfície, nos quais são geralmente empregadas doses mais elevadas que aquelas que visam ao fornecimento de S e Ca às plantas.

Quaggio et al. (1993) observaram que praticamente todo o S-sulfato foi lixiviado para profundidades maiores que 40-60 cm aos 18 meses da aplicação de gesso agrícola, essas observações mostram a rapidez com que o íon sulfato é removido do perfil, e que mais atenção deve ser dada ao S para que esse não venha a ser limitante às culturas, especialmente em solos com baixos teores de matéria orgânica, sua principal reserva.

Zandona (2015) avaliou os atributos químicos do solo e a produtividade de grãos de milho e de soja, com o uso de gesso e calcário agrícola com o objetivo de mensurar a capacidade de amenizar o efeito déficit hídrico, pois é comum a ocorrência desses períodos devido a condições climáticas, que pode reduzir a produtividade de grãos. Onde observou que o gesso agrícola aumentou a produtividade de grãos de milho e de soja, com resposta até a dose de 2 toneladas por hectare, com incrementos de 9,3 %, para o milho, e 11,4 % e 11,3 %, respectivamente com e sem calcário, para a soja.

A aplicação de gesso agrícola ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) tem sido avaliada como alternativa para a melhoria da qualidade química do perfil do solo no sistema plantio direto sem necessidade de interrupção do sistema, proporcionando o aprofundamento do sistema radicular e a maior eficiência na absorção de água e nutrientes do solo (DALLA NORA; AMADO, 2013)

2.5.2 Enxofre elementar

Devido à necessidade da redução dos custos na agricultura brasileira, é importante utilizar fontes de S que possibilitem a sua adição, em teores adequados, em formulações comerciais com alta concentração em NPK. Entre estas fontes destaca-se o enxofre elementar, com 99% de S, que pode possibilitar a obtenção de fertilizantes com alta concentração de nutrientes NPK e com alto teor de S. Nesse contexto tem sido apontado o uso de enxofre elementar (S^0) como fertilizante. Numa revisão de literatura, Horowitz e Meurer (2006), relata que em diversos países, fertilizantes contendo S^0 vêm sendo utilizados de forma crescente. Estes incluem o S^0 sob várias formas: puro (como pó), incorporado a fertilizantes granulados,

granulado com agentes dispersantes e em suspensões aquosas para aplicação em sistemas de irrigação.

Segundo Vitti et al. (2007), o S⁰, quando aplicado ao solo, somente é absorvido pelas plantas depois de sua oxidação a sulfato por meio de reações catalisadas, principalmente, por microrganismos. E quando absorvido proporciona o aumento dos níveis de nitrogênio na cultura soja, resultando em maior produtividade. Pois, segundo estudos, Vitti et al. (2007) indicam que a aplicação de S via foliar aumenta a produção de grãos em soja, semelhantemente ao que ocorre com a aplicação de S no solo. Porém, as mesmas produtividades foram observadas quando se aplicou 20 kg ha⁻¹ de S no solo ou 6 kg ha⁻¹ via foliar, onde a eficiência da aplicação de S via foliar, com base no conteúdo de proteína solúvel total, foi superior à da aplicação via solo. Portanto avaliar a eficiência do uso de enxofre é um ponto que ainda precisa ser estudado a fim de melhorar o aproveitamento destes nutrientes pela cultura.

Vários grupos de microrganismos podem oxidar o S⁰ no solo, como os quimioautotróficos sendo as bactérias do gênero *Thiobacillus*, os fotoautotróficos e os heterotróficos (bactérias e fungos). Na maioria dos solos aeróbicos (bem oxigenados), os organismos quimioautotróficos e heterotróficos são os mais importantes (GERMIDA; JANZEN, 1993). Como a maioria dos processos mediados por microrganismos, a taxa de oxidação do S⁰ é afetada por fatores como temperatura, pH do solo, umidade, aeração, teores de nutrientes e matéria orgânica.

Consequentemente, fatores que alteram, mesmo que marginalmente, a temperatura do solo, como o manejo de resíduos, a cor do solo, a profundidade de colocação do fertilizante e a sua época de aplicação afetarão a taxa de oxidação. Além disso, a alta sensibilidade à temperatura dos microrganismos que realizam a oxidação do S⁰ indica que a eficiência de fertilizantes que contém S⁰ pode variar muito entre regiões climáticas (GERMIDA; JANZEN, 1993). Portanto, em regiões frias é possível que a eficiência dos fertilizantes com S⁰ seja baixa.

A oxidação do S-elementar é afetada por propriedades físicas do solo, apesar destes efeitos nem sempre serem consistentes (GERMIDA; JANZEN, 1993). Em algumas investigações, as taxas de oxidação foram inversamente relacionadas ao teor de argila e diretamente relacionada ao teor de areia. Porém, solos pouco estruturados tendem a ter menor taxa de oxidação quando comparados com os melhores estruturados (HOROWITZ; MEURER, 2006). Muitas destas observações são, provavelmente, reflexos indiretos do estado

de aeração dos solos (GERMIDA; JANZEN, 1993) que afetam as reações microbiológicas de oxidação do S⁰.

O pH do solo está quase sempre, relacionado positivamente com a taxa de oxidação do S⁰, este efeito positivo do pH mais elevado possivelmente se relaciona 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 S⁰ em S-sulfato (GERMIDA; JANZEN, 1993). Para um Latossolo Vermelho distrófico típico da região do Cerrados, Horowitz e Meurer (2006) demonstrou que há uma relação positiva entre a oxidação do S-elementar e o pH inicial do solo.

A fertilidade do solo pode influir na oxidação do S⁰, embora este efeito, frequentemente, seja de pouca magnitude ou inconsistente. A ausência de uma relação bem definida entre a oxidação do S⁰ e as várias propriedades físicas e químicas do solo não implica, necessariamente, que estes efeitos não sejam importantes. É provável que a oxidação seja governada pela interação e integração destes fatores e não apenas por um fator isolado, exceto em casos extremos (GERMIDA; JANZEN, 1993).

Estudos demonstram o efeito positivo entre a taxa de oxidação do S⁰ e o teor de matéria orgânica do solo. Isto pode ser atribuído à resposta de organismos heterotróficos que oxidam o S-elementar utilizando o substrato disponível como fonte de energia (HOROWITZ; MEURER, 2006).

O tamanho da partícula do S⁰ quando reduzido e adicionado ao solo ocorre aumento acentuado na taxa de oxidação devido ao aumento da área superficial das partículas, o que favorece o contato com os microrganismos oxidantes (WAINWRIGHT, 1984).

3 METODOLOGIA

O diagnóstico foi realizado utilizando-se do banco de dados de análises de solo do Laboratório de Análises de Solo e Tecido Vegetal da CCGL TECNOLOGIA, no período de 2001 a 2016. A análise dos dados foram divididas em três períodos sendo eles 2001 a 2006, 2007 a 2012 e 2013 a 2016, englobando um total de 197.587 análises as quais foram realizadas leitura dos teores de enxofre extraível.

Tabela 2. Quantidade de amostras de solo realizada em três períodos pelo Laboratório de solos da CCGL TEC. Com leitura do Teor de Enxofre Extraível.

PERIODOS	Nº DE AMOSTRAS
2001 Á 2006	28.169
2007 Á 2012	72.879
2013 Á 2016	96.538
Total	197.586

A metodologia de análise dos teores de enxofre extraível do solo é proposta pela COMISSÃO... (2016) através da extração de enxofre com utilização de solução de $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)$ 500 mg L^{-1} de P, seguida da determinação por turbidimetria com cloreto de bário, após a digestão do extrato com ácido perclórico. Os resultados das análises de solo foram sistematizados utilizando-se de planilha eletrônica Excel. Posteriormente foram calculada a distribuição de frequência (percentagem) das análises dos teores de enxofre extraível, considerando as faixas de <5,0; 5,1 a 10; 10,1 a 15; 15,1 a 20 e > 20 mg dm^{-3} .

O trabalho de campo foi conduzido em duas áreas de lavouras manejadas no sistema plantio direto, uma na área experimental da CCGL TECNOLOGIA e outra em área de produtor, na localidade de Novo Horizonte, ambas no município de Cruz Alta, RS. O clima dominante é do tipo Cfa 1 da Classificação de Köppen (ALVARES et al., 2013). A temperatura média anual é de 18°C e a precipitação normal é de 1700 mm, apresentando períodos de deficiência hídrica durante o verão.

O solo dos locais é classificado como LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico (EMBRAPA, 2017) com textura argilosa e franco argilosa (Tabela 01), pertencente à Unidade de Mapeamento de Passo Fundo (BRASIL, 1973).

Tabela 3. Análise granulométrica do solo das áreas experimentais.

Local Experimento	Argila	Silte	Areia	Classe Textural
	----- g kg ⁻¹ -----			
CCGL	480	280	240	Argila
Novo Horizonte	360	250	390	Franco Argiloso

O solo das áreas experimentais foi amostrado para a caracterização da condição inicial (tabela 2) coletando-se na profundidade de 0 a 20, 20 a 40 e 40 a 60 cm de profundidade, amostras compostas de 10 sub-amostras, objetivando-se a determinação analítica dos atributos relativos à fertilidade do solo, como, Argila, pH, SMP, Fósforo, Potássio, Matéria Orgânica, Al, Ca, Mg, S.

Os tratamentos foram constituídos de dois fatores: Fator A (Fonte de enxofre): Elementar (S-S⁰) e Sulfato (S-SO₄⁻²); Fator B (doses de enxofre): 0, 75, 150, 225 e 300 kg ha⁻¹ de enxofre. Os tratamentos foram aplicados manualmente à lancha em superfície e de maneira uniforme na área da parcela, sem incorporação, aproximadamente 10 dias antes da semeadura da soja 2016/2017 (1^o cultivo). Foram utilizadas as fontes de fertilizantes, respectivamente, S90 (90% de S-S⁰) e Gesso agrícola (15% de S-SO₄⁻²), ajustando a dose de produto comercial, objetivando atingir as doses correspondentes a cada parcela.

O delineamento experimental foi o bi-fatorial (2x5), no esquema de parcelas subdividida, em blocos ao acaso, com 4 repetições, e as parcelas de 3,2m x 7,0m (totalizando uma área útil de 22,4m²).

Tabela 4. Características químicas na camada de 0 a 20, 20 a 40 e 40 a 60 cm de profundidade, na condição inicial das áreas experimentais da pesquisa com soja safra 2016/2017. Cruz Alta, RS. 2017.

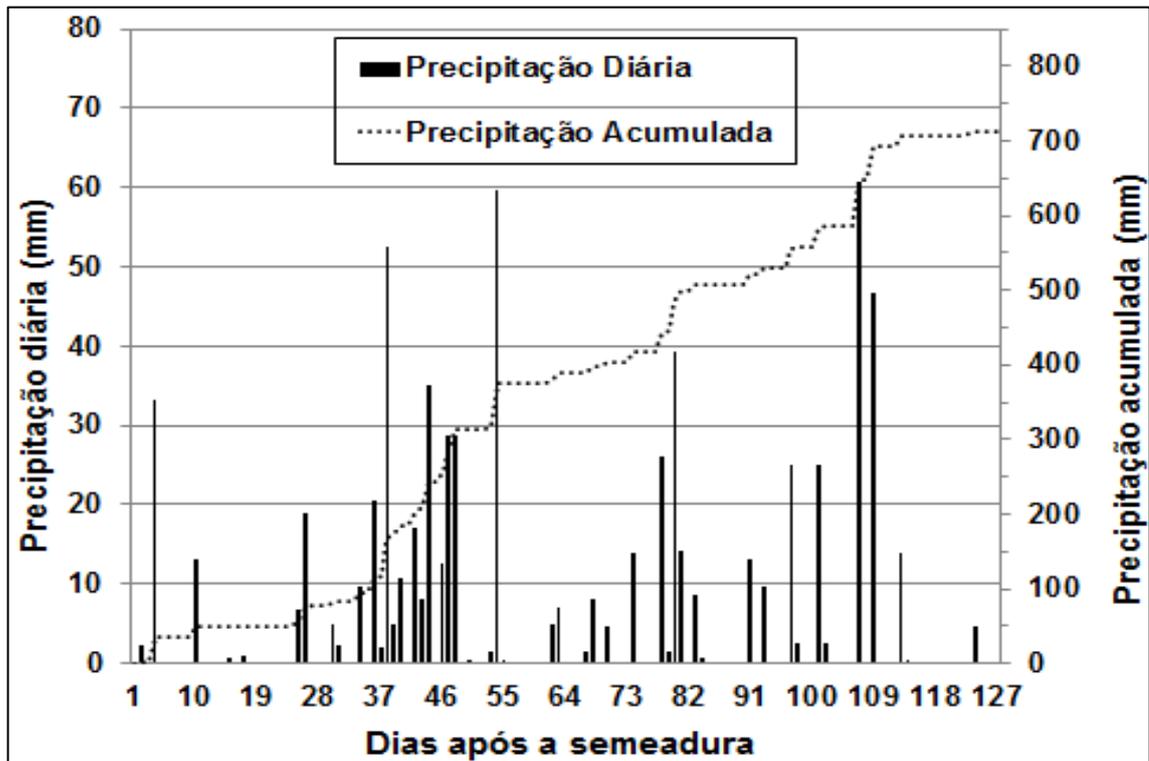
Profundidade cm	Argila g/Kg	pH H ₂ O	Índice SMP	P .. mg dm ⁻³ ..	K	S	MO %	Al	Ca	Mg	CTC cmol _c dm ⁻³	Saturação (%)	
												Bases	Al
..... Área de Pesquisa CCGL TEC													
0 a 20	48	5,1	5,5	19,8	144	8,7	2,7	0,2	6,3	2,2	16,6	53,4	2,2
20 a 40	56	5,6	6,1	4,3	65	8,2	2,3	0,0	6,4	2,2	12,7	69,3	0,0
40 a 60	60	5,6	6,2	3,8	63	7,1	2,4	0,0	6,3	2,3	12,3	71,7	0,0
..... Área de Pesquisa Novo Horizonte													
0 a 20	36	5,1	5,8	19,2	47	8,4	2,2	0,4	3,9	1,2	10,7	48,8	7,1
20 a 40	36	5,1	6,0	2,1	20	7,2	2,0	0,4	3,2	1,0	8,7	49,4	8,6
40 a 60	38	4,9	5,6	1,6	20	3,9	1,8	1,0	2,6	0,8	10,4	33,3	22,5

Fonte: Amostras analisadas por Laboratório de Solos da CCGL-Tec.

O trabalho de campo foi avaliado numa sequência de 3 cultivos: soja safra 2016/2017 (1^o cultivo), trigo safra 2017 (2^o cultivo) e soja safra 2017/2018 (3^o cultivo). A precipitação

pluviométrica diária e acumulada no período experimental da pesquisa conduzida nos cultivos é apresentada nas Figuras 1, 2 e 3, respectivamente.

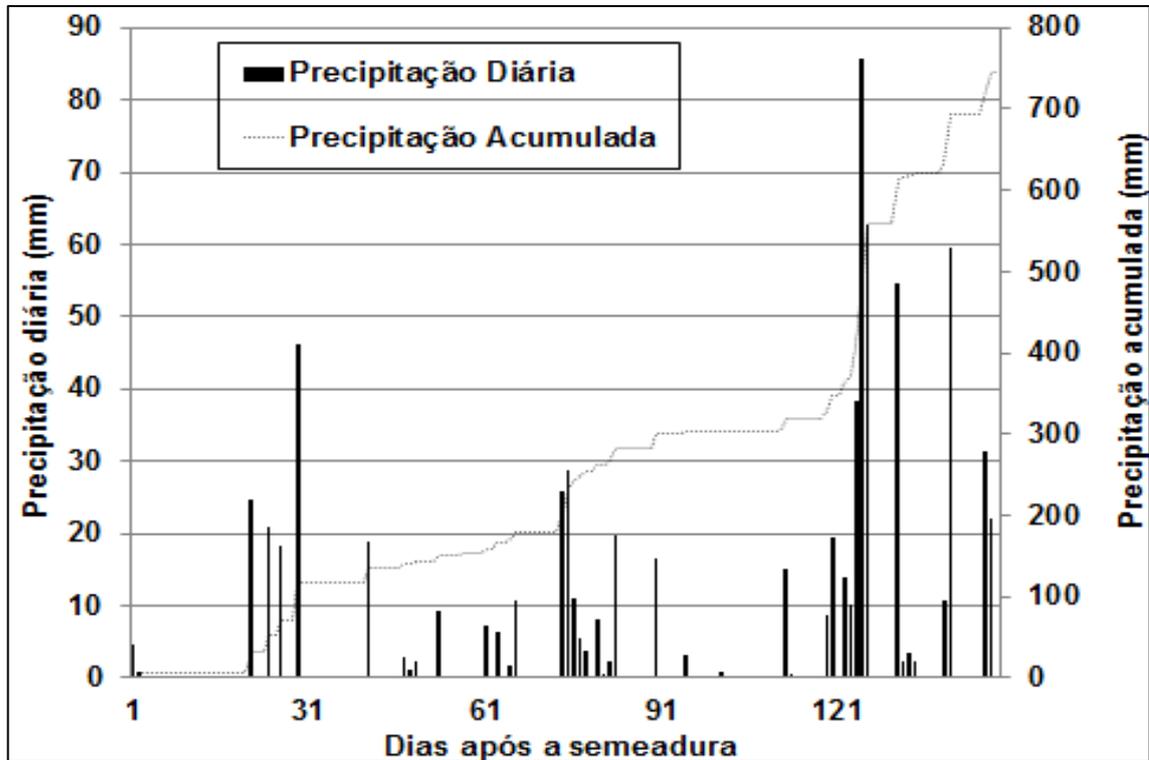
Figura 1. Precipitação pluviométrica diária e acumulada no período experimental da pesquisa com enxofre em Soja 2016/2017. UNICRUZ, Cruz Alta, RS, 2017.



Fonte: Estação meteorológica CCGL-TEC (2017).

Durante safra 2016/2017 tivemos grandes acumulados de precipitação nos primeiros 60 dias de implantação do experimento, o S pode ter sido lixiviado para além da área ativa das raízes com essas fortes chuvas. Essa mobilidade do sulfato-enxofre torna seu uso necessário como ferramenta para suprir as necessidades de fertilização da cultura. Quando ocorrem as chuvas do início da primavera, os solos com superfície arenosa, mas com conteúdo relativamente elevado de argila em seu subsolo, podem passar pela lixiviação de S na superfície mas o mantém no subsolo. Assim, as lavouras que crescem nestes tipos de solos podem apresentar uma deficiência inicial de S, mas conforme as raízes penetram no subsolo, a deficiência pode desaparecer. Solos com textura argilosa tendem a reter mais o sulfato. Esse acumulado de chuva no período inicial pode influenciar na disponibilidade do nutriente, visto sua dinâmica no solo.

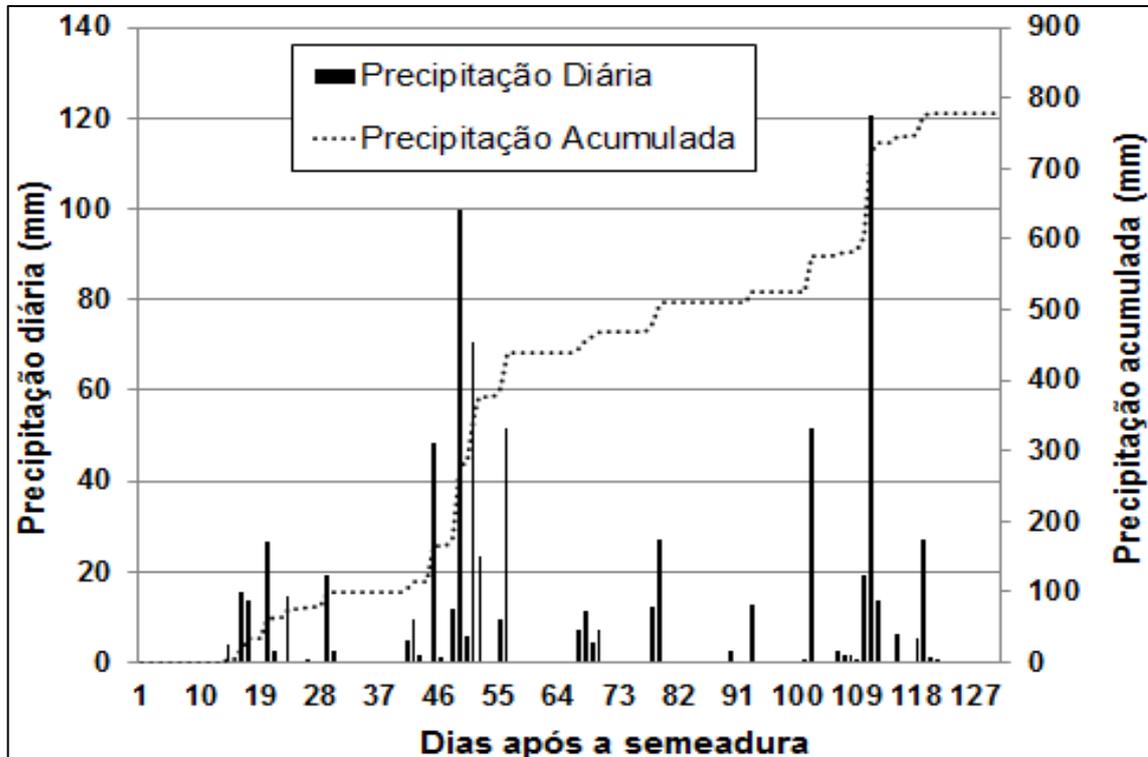
Figura 2. Precipitação pluvial diária e acumulada no período experimental da pesquisa com enxofre em trigo 2017. UNICRUZ, Cruz Alta, RS, 2017.



Fonte: Estação meteorológica CCGL-TEC (2017).

Na safra de trigo 2017 tivemos um período inicial de 27 dias sem chuva, que afetou a cultura durante germinação e estabelecimento, já ao final do ciclo durante os meses de agosto, setembro e outubro tivemos grande acumulados. Essas situações tem influência direta na dinâmica do S no solo, podendo influenciar na taxa de mineralização e lixiviação desse nutriente. A chuva pode ser uma importante fonte de suprimento de enxofre. Em solos argilosos, o enxofre aportado 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. Assim podendo afetar de forma direta o próximo cultivo da soja na safra 2017/2018.

Figura 3. Precipitação pluvial diária e acumulada no período experimental da pesquisa com enxofre em Soja 2017/2018. UNICRUZ, Cruz Alta, RS, 2018.



Fonte: Estação meteorológica CCGL-TEC (2018).

A semeadura das culturas foram realizadas, no sistema plantio direto, em 24 de novembro de 2016, 16 de junho de 2016 e 29 de novembro de 2017, respectivamente, na soja safra 2016/2017 (1º cultivo), trigo safra 2017 (2º cultivo) e soja safra 2017/2018 (3º cultivo). A adubação e os demais tratos culturais da cultura da soja foram realizados segundo as Indicações Técnicas para a Cultura da Soja no Rio Grande do Sul e Santa Catarina 2016/2017 e 2017/2018 (REUNIÃO, 2016) e segundo as Informações Técnicas para Trigo e Triticale – Safra 2016 (REUNIÃO, 2015), respeitando as condições descritas nos tratamentos.

A produtividade de grãos de soja e de trigo foi avaliada na maturação de colheita, colhendo-se uma área útil de 3 linhas de 4 metros de comprimento de soja (5,4 m²), e 7 linhas de 4 metros de comprimento de trigo (4,76 m²), expressando os resultados em kg ha⁻¹ a 13% de umidade. Amostras de sementes de cada parcela colhida de soja e de trigo foram submetidas à análise de peso de cem sementes (PCS) e peso do hectolitro (PH), respectivamente, seguindo metodologia específica (BRASIL, 2009).

Para a caracterização do efeito residual dos tratamentos nos incrementos dos teores de enxofre no solo, foi realizada a coleta de amostra de solo aos 6 e 18 meses após a aplicação dos fertilizantes, respectivamente após a colheita da soja 2016/2017 (1º cultivo) e soja 2017/2018 (3º cultivo). A amostragem de solo foi realizada nas camadas 0 a 20, 20 a 40 e 40

a 60 cm de profundidade, compostas de 4 sub-amostras por parcela. A coleta foi realizada com pá de corte, utilizando-se em cada ponto de uma trincheira transversal a linha de semeadura, do centro de uma entre-linha ao centro da outra entre-linha. A análise foi realizada conforme metodologia descrita por Tedesco et al. (1995).

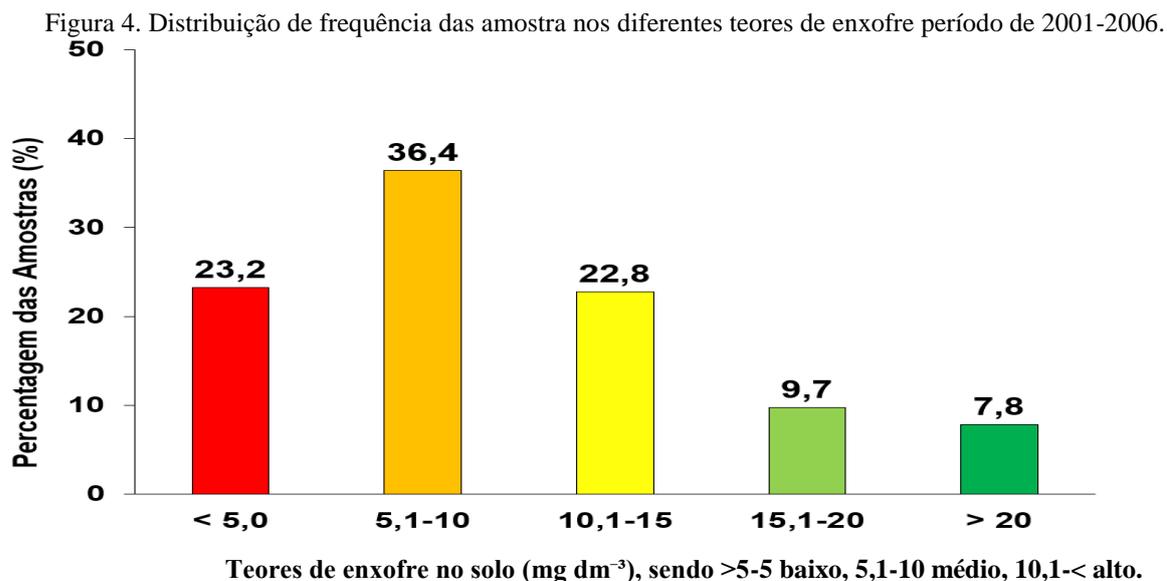
Os resultados foram submetidos à análise da variância e quando os valores de F (Tratamento) serão significativos ao nível de 5 % de probabilidade, foi submetido ao Teste de Duncan ($p < 0,05$), usando o pacote estatístico SASM Agri - Versão 8.2 (CANTERI, 2001).

Foram calculados dados de máxima eficiência técnica (MET), eficiência de uso do enxofre(EUS) além do incremento de produtividade na máxima eficiência técnica, para todos os cultivos. Além de produtividade acumulado no período.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Diagnóstico dos Teores de Enxofre do Solo

Os resultados obtidos através do levantamento de dados do laboratório de análise da CCGL TEC com relação aos teores de enxofre no solo (tabela 4) foram fracionados em três períodos para verificar a existência de variação desse nutriente ao longo dos anos. Observa-se um número significativo e crescente de análises de solo oriundas de diferentes regiões do Estado do RS, ao longo dos três períodos, sendo 28.169, 72.879 e 96.538 amostras, respectivamente nos períodos de 2001 à 2006, 2007 à 2012 e 2013 à 2016, totalizando em 197.586 amostras.



Na figura 4 pode-se observar que 59,65% das análises encontram-se abaixo de 10 mg dm⁻³ sendo essa a primeira época de 2001 a 2006. O que indica a necessidade de uso desse fertilizante, visto que outra grande parte dos produtores não determinam esse nutriente em suas análises de solo. Já na figura 5 tem-se um aumento para 67,5% das amostras analisadas com valores inferiores ao indicado para a cultura da soja, sendo o período de 2007 a 2012, o que pode ser explicado pelo aumento de produção nesse período.

Figura 5. Distribuição de frequência das amostras nos diferentes teores de enxofre período de 2007-2012.

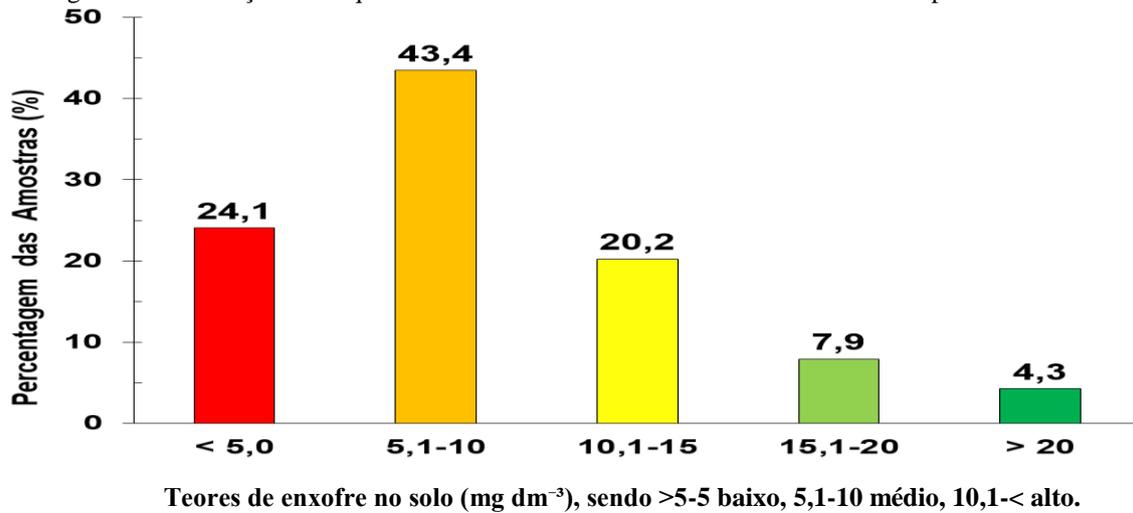
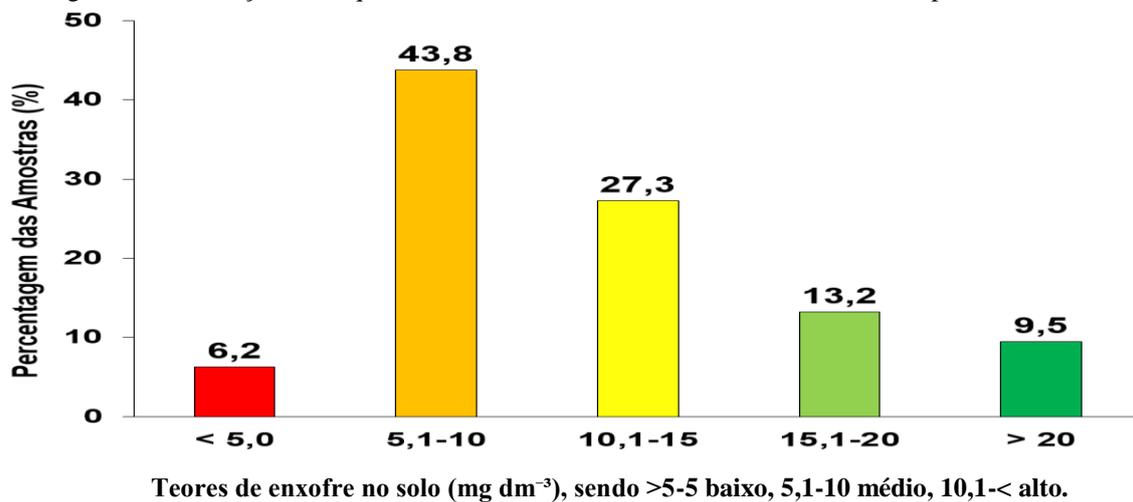


Figura 6. Distribuição de frequência das amostras nos diferentes teores de enxofre período de 2013-2016.



Ao analisar figura 6 observa-se que 50,0% das análises apresentam os teores enxofre no solo abaixo de 10 mg dm⁻³, respectivamente nos períodos de 2013 á 2016, coincidindo com os dados dos períodos anteriores. Resultados semelhantes foi encontrado em estudo realizado com mais de 90 mil amostras de solo das mais diversas regiões do RS, Rheinheimer et al. (2005) relatam que 49% delas contêm teores de S disponível menores do que 10 mg dm⁻³ e 12,3% possuíam teores abaixo de 5 mg dm⁻³. Assim, supõe-se que a aplicação de fertilizantes sulfatados em cultivos nos mais diversos solos do RS, especialmente naqueles com baixos teores de argila e de matéria orgânica, possa aumentar a disponibilidade de sulfato no solo e, por consequência, aumentar o rendimento das culturas. Outro fator que podemos levar em consideração é o fato das áreas serem manejadas sob plantio direto, assim a formação de um gradiente de concentração de nutrientes e da MO ao longo do perfil, devido ao cultivo sem revolvimento do solo (DALLA NORA; AMADO, 2013).

Para Sfredo & Lantmann (2007) a frequência em ocorrer deficiências de enxofre nos solos cultivados é crescente, e existem vários fatores que contribuem para isso, incluindo o aumento na produção das culturas que removem grandes quantidades de enxofre como a soja, a crescente utilização de fertilizantes de alta concentração que contém pouco ou nenhum enxofre acidental, a imobilização de enxofre na matéria orgânica que é acumulada em decorrência das práticas conservacionistas (plantio direto, cultivo mínimo, etc.) e a maior preocupação quanto às necessidades de enxofre para produções lucrativas e qualidade dos produtos, são fatores atrelados a esses incrementos no último período.

Entretanto, observa-se um notável incremento nos teores de enxofre principalmente no último período. Isso provavelmente deve estar atribuído a preocupação de alguns produtores com a importância do enxofre, devido a esse ser um macronutriente fundamental, além da intensificação dos cuidados com relação ao solo que tem sido crescente alicerçado na busca de tetos produtivos maiores e maior eficiência econômica.

Baseado em diagnóstico dos teores de enxofre extraível no solo das áreas em implantação de Agricultura de Precisão no Rio Grande do Sul, Silva et al. (2013), também constataram grande probabilidade de respostas à aplicação de fertilizantes contendo enxofre. Segundo os autores, a alta frequência de análises com os teores de enxofre extraível abaixo do crítico, pode estar associada às sucessivas exportações do nutriente, através das altas produtividades que vêm sendo obtidas nos sistemas de produção de grãos, aliadas à utilização frequente de fertilizantes NPK cada vez mais concentrados e com baixos teores de enxofre. Broch et al. (2011), relata que a cultura da soja responde à aplicação de fontes solúveis de enxofre, mas a resposta normalmente se limita a solos pobres neste nutriente. A grande maioria das fontes de S utilizadas foi eficiente em fornecer este nutriente para a soja, porém o enxofre elementar não foi eficiente em disponibilizar S para a cultura. No entanto, dentro do cenário atual, com o surgimento de novos cultivares, com alta produtividade, com ciclo relativamente mais curto, associado aos teores de S no solo mais baixo existe uma probabilidade de respostas ao uso do nutriente.

Os níveis de suficiência de S no solo da camada de 0–10 cm, estabelecidos pela COMISSÃO, (2016), podem ser insuficientes para fins de predição da disponibilidade de S e da resposta das plantas à adição desse nutriente. Além disso, o teor de suficiência de S, que varia em função da espécie cultivada, deve considerar também o tipo de solo, pois teores semelhantes de S disponível em solos diferentes podem proporcionar produção distinta.

4.2 Produtividade de Grãos

Os resultados de produtividade de grãos em resposta à diferentes fontes e doses de fertilizantes contendo S são apresentados nas Figuras 7,8,9,10,11 e 12, respectivamente para o solo argiloso e franco argiloso. Nas duas condições de solo e fontes de fertilizantes contendo S, houve resposta significativa e ajuste de modelos de regressão quadrático para a produtividade de grãos de trigo safra 2017, soja safra 2017/2018 e produtividade acumulada. (Tabela 5).

Nas condições estudadas, não houve resposta significativa às fontes e doses de fertilizantes contendo S sobre a produtividade de grãos do 1º cultivo (soja safra 2016/17) após a aplicação dos tratamentos. Como os teores de S no solo encontram-se abaixo do preconizado como teor crítico de 10 mg dm^{-3} (COMISSÃO..., 2016), é de se esperar que houvesse resposta já no 1º cultivo. Considerando que as fontes de fertilizantes foram aplicadas imediatamente antes da semeadura, é provável que os efeitos não tenham se pronunciados o suficiente para mostrar significativos, mesmo com a utilização de S na forma de sulfato que é imediatamente disponível (NOGUEIRA; MELO, 2003; PAVAN; VOLKWEISS, 1986; ROSSETTO; SANTIAGO, 2011; ZANDONA, 2015).

Entretanto, com relação ao uso do S elementar, a curto prazo (1º cultivo) a não obtenção de resposta pode ser atribuída a necessidade de sua oxidação a sulfato por meio de reações catalisadas por microrganismos e conseqüentemente existem vários fatores que alteram esse processo. Além da alta sensibilidade dos microrganismos à temperatura do solo, outros fatores são importantíssimos, a matéria orgânica do solo, a profundidade de colocação do fertilizante e a sua época de aplicação que afetam a taxa de oxidação (VITTI *et al.*, 2007; GERMIDA; JANZEN, 1993; HOROWITZ; MEURER, 2006).

Apesar dos indicadores serem favoráveis como solos com baixos teores de argila e matéria orgânica e menor disponibilidade de S e, por esse motivo que a adubação sulfatada incrementaria a produção já no primeiro. A ausência de resposta à adição de fertilizante contendo S pode estar associada a grande complexidade em função dos inúmeros fatores que controlam a dinâmica do S no solo, cuja disponibilidade varia amplamente com as condições de solo, clima e cultivo (OSORIO-FILHO, 2006). Na prática observa uma dinâmica totalmente diferente entre as fontes de fertilizantes. No caso do S sulfato, embora disponível, possa ter ocorrido uma rápida lixiviação. No S elementar, necessita ser oxidado a sulfato para ser aproveitado, mas permanece por um período maior de tempo disponível para cultura.

Figura 7. Produtividade de grãos de trigo 2017 (A) em resposta à diferentes fontes e doses de fertilizantes contendo enxofre em solo argiloso. Cruz Alta, RS. 2018.

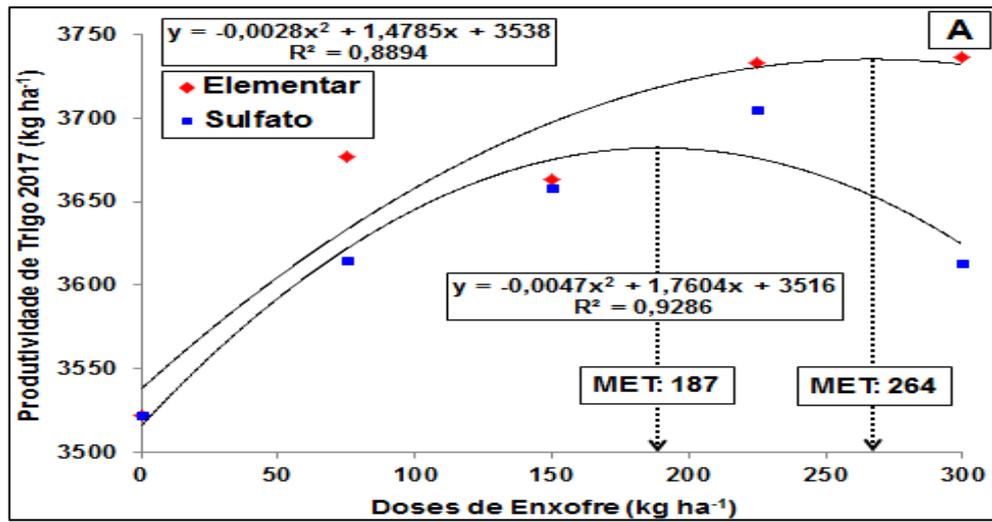


Figura 8. Produtividade de grãos de soja 2017/2018 (B) em resposta a diferentes fontes e doses de fertilizantes contendo enxofre em solo argiloso. Cruz Alta, RS. 2018.

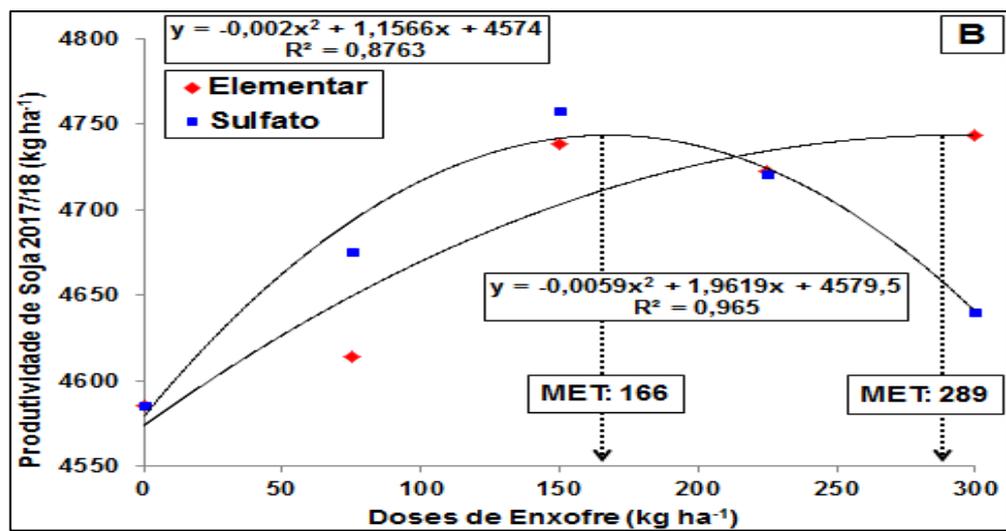


Figura 9. Produtividade de grãos acumulada (C) em resposta à diferentes fontes e doses de fertilizantes contendo enxofre em solo argiloso. Cruz Alta, RS. 2018.

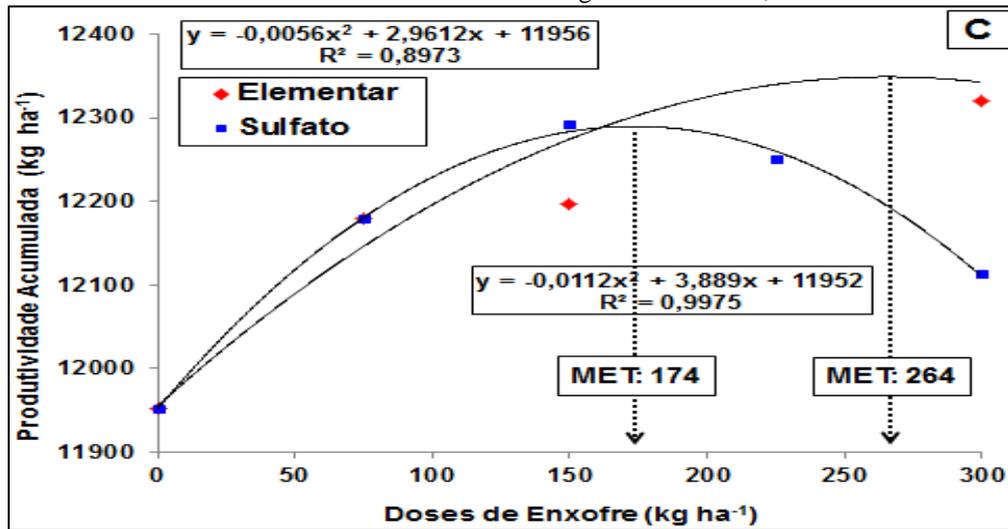


Figura 10. Produtividade de grãos de trigo 2017 (A) em resposta à diferentes fontes e doses de fertilizantes contendo enxofre em solo franco argiloso. Cruz Alta, RS. 2018.

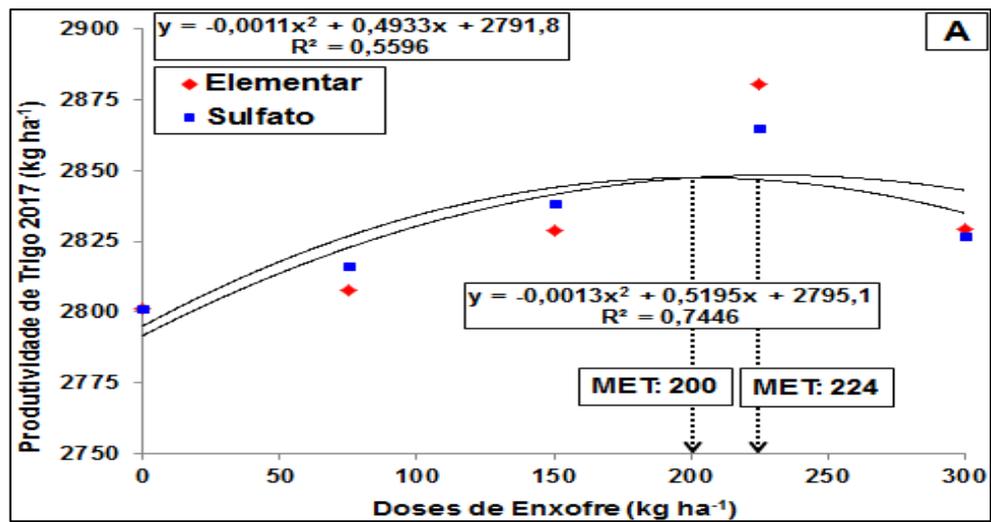


Figura 11. Produtividade de grãos de soja 2017/2018 (B) em resposta à diferentes fontes e doses de fertilizantes contendo enxofre em solo franco argiloso. Cruz Alta, RS. 2018.

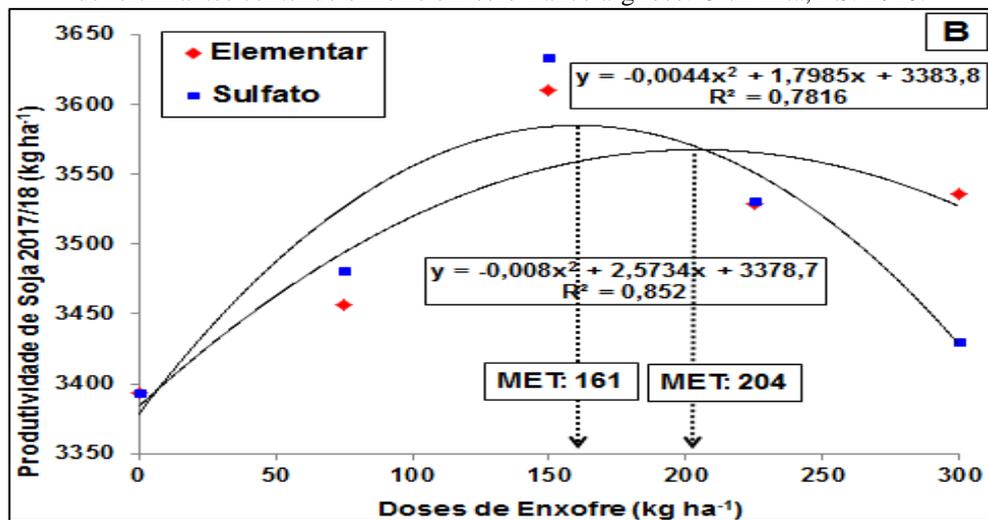


Figura 12. Produtividade de grãos acumulada (C) em resposta à diferentes fontes e doses de fertilizantes contendo enxofre em solo franco argiloso. Cruz Alta, RS. 2018.

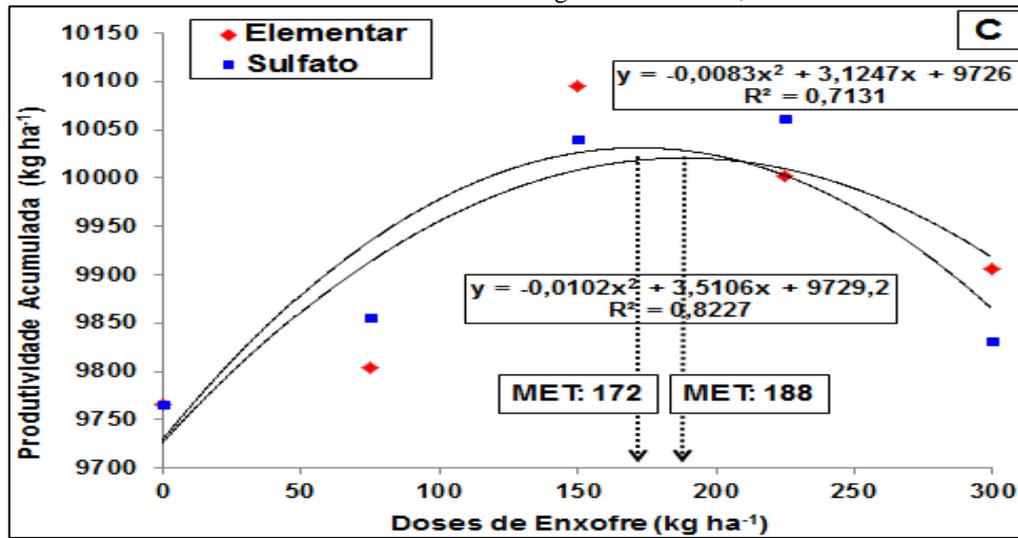


Tabela 5. Curva de melhor ajuste para produtividades de grãos, dose de máxima eficiência técnica (MET), eficiência de uso de enxofre (EUS) e incremento de produtividade na MET das culturas de soja 16/17 (1º cultivo), trigo 2017 (2º cultivo), soja 2017/18 (3º cultivo) e produtividade acumulada em resposta à diferentes fontes e doses de fertilizantes contendo enxofre em solo argiloso e franco argiloso. Cruz Alta, RS. 2018.

Cultura Safrá	Doses de Enxofre Elementar				Doses de Enxofre Sulfato			
	Ajuste Modelo	MET kg ha ⁻¹	EUS ⁽¹⁾ kg kg ⁻¹	Incremento kg ha ⁻¹	Ajuste Modelo	MET kg ha ⁻¹	EUS kg kg ⁻¹	Incremento kg ha ⁻¹
----- Solo Argiloso -----								
Soja 16/17	--- ⁽²⁾	---	---	---	---	---	---	---
Trigo 2017	Quadrático	264	1,48	390	Quadrático	187	1,76	330
Soja 17/18	Quadrático	289	1,15	334	Quadrático	166	1,96	326
Acumulada	Quadrático	264	2,96	783	Quadrático	174	3,88	675
----- Solo Fraco Argiloso -----								
Soja 16/17	---	---	---	---	---	---	---	---
Trigo 2017	Quadrático	224	0,49	111	Quadrático	200	0,52	104
Soja 17/18	Quadrático	204	1,79	368	Quadrático	161	2,57	414
Acumulada	Quadrático	188	3,12	588	Quadrático	172	3,50	604

(1) EUS: eficiência de uso do enxofre em kg de grãos por kg de nutriente aplicado; (2) --- Sem ajuste/resposta

Com a resposta significativa e ajuste de modelos de regressão quadrático para a produtividade de grãos de trigo safra 2017 (2º cultivo), soja safra 2017/2018 (3º cultivo) e produtividade acumulada (Tabela 4), foi possível a definição de doses de máxima eficiência técnica (MET), eficiência de uso de S.

No solo argiloso, os incrementos de produtividade na MET para as fontes de S elementar e sulfato foram de 390, 334, 783 e 330, 326, 675 kg ha⁻¹ de grãos, respectivamente para trigo, soja e produtividade acumulada dos 3 cultivos (Tabela 5). As doses de MET foram de 264, 289, 264 e 187, 166, 174 kg ha⁻¹ de S, respectivamente para trigo, soja e

produtividade acumulada dos 3 cultivos. Nessa condição de estudo (solo argiloso), observa-se que os incrementos foram maiores quando do uso de S elementar, mas com doses de MET superiores quando comparado à fonte de S sulfato, mostrando que as respostas foram até as maiores doses (Figura 7,8 e 9). Esse comportamento é explicado pela liberação gradual do S elementar sendo disponibilizado durante todo o ciclo da cultura.

Entretanto, considerando a eficiência de uso do S em kg de grão produzido por kg de S aplicado, a maior eficiência é observada no S sulfato. Esse comportamento é explicado pela liberação imediata do S sulfato assim como a utilização dessa fonte na superfície de solos argilosos. Adicional a isso, em solos argilosos a sua movimentação no perfil se torna mais lenta, comparativamente a solos com menor quantidade de argila, devido aos teores elevados de óxidos de ferro que apresentam alta capacidade de retenção do ânion $S-SO_4^{-2}$ (OSÓRIO FILHO 2006), resultando em menores perdas em profundidade e mantendo uma maior disponibilidade e eficiência do S aplicado.

No solo franco argiloso, os incrementos de produtividade na MET para as fontes de S elementar e sulfato foram de 111, 368, 588 e 104, 414, 604 kg ha⁻¹ de grãos, respectivamente para trigo, soja e produtividade acumulada dos 3 cultivos. Nesse solo, as doses de MET foram de 224, 204, 188 e 200, 161, 172 kg ha⁻¹ de S, respectivamente para trigo, soja e produtividade acumulada dos 3 cultivos. Nessa condição de estudo (solo franco argiloso), observa-se que os incrementos de produtividade obtidos pelo uso do S elementar e sulfato foram similares, às vezes superior, em outras inferior, mas com doses de MET sempre um pouco superior quando do uso de S elementar. Isso pode estar atribuído provavelmente ao comportamento do processo de oxidação do S elementar, que embora necessite de um tempo para se tornar disponível a planta, no solo franco argiloso ocorre um pouco mais rápido, devido a presença de maior macroporosidade, aeração e temperatura do que em solos argilosos que apresentam a sua taxa de mineralização provavelmente mais lenta. Adicional a isso, em solos francos, arenosos ou pouco intemperizados, a fonte sulfato tende a deslocar-se mais rapidamente para os horizontes subsuperficiais, ou mesmo, sair do sistema solo por lixiviação quando comparado ao solo argiloso.

Apesar disso, de forma semelhante ao solo argiloso, a eficiência de uso do S é maior quando do uso do S na forma de sulfato. Os solos argilosos com altos teores de óxidos de ferro apresentam grande capacidade de adsorção de SO_4 , o que diminui a sua movimentação no perfil do solo tornando mais eficiente. Já em solos arenosos a movimentação do sulfato é maior e, com isso, e pode ser facilmente perdido por percolação. Além disso, solos arenosos possuem baixos teores de matéria orgânica, conseqüentemente, menores reserva de S

orgânico, taxa de mineralização mais alta tendo maiores respostas com o uso do S na forma elementar.

A movimentação em profundidade do $S-SO_4^{-2}$ e sua distribuição no perfil quando é aplicado na superfície do solo é favorecida pela sua capacidade de ligação com cátions, formando moléculas com carga nula, facilitando, assim, sua descida (CREMON et al. 2009). Entretanto a literatura tem mostrado que outros fatores também interferem nesse processo. O pH do solo, por sua vez, interfere na energia de ligação dos grupos funcionais aos cátions metálicos estruturais dos argilominerais e óxidos do solo, e seu aumento causa sua desprotonação, dificultando e até impedindo a adsorção de sulfato (CASAGRANDE et al., 2003; GOLDBERG, 2010). Além disso, a energia de ligação do sulfato ao solo é fraca, quando comparada, por exemplo, à do íon fosfato (POZZA et al., 2009). Esse processo potencializa sua percolação no perfil do solo, especialmente em solos de textura arenosa (OSÓRIO FILHO et al., 2007).

Com base nas curvas de melhor ajuste para produtividades de grãos e considerando o custo das fontes fertilizantes contendo S e o valor da soja e trigo, calcularam-se as doses de máxima eficiência econômica (MEE), os incrementos em produção e os cenários de resposta econômica a adubação sulfatada nas duas condições de solo (Tabela 6).

Tabela 6. Cenário de resposta econômica da adubação com diferentes fontes de fertilizantes contendo enxofre num período de 3 cultivos (soja-trigo-soja) em solo argiloso e franco argiloso. Cruz Alta, RS. 2018.

Adubação Enxofre	Dose Calculada		EUS ⁽⁵⁾ kg kg ⁻¹	Incremento Produção ⁽⁶⁾ (kg ha ⁻¹)	Custo ⁽⁷⁾ Adubação R\$ ha ⁻¹	Retorno da Adubação	
	MEE ⁽¹⁾	Fertilizante ⁽⁴⁾				Bruto ⁽⁸⁾ R\$ ha ⁻¹	Líquido R\$ ha ⁻¹
----- kg ha ⁻¹ -----							
----- Solo Argiloso -----							
Elementar ⁽¹⁾	73,4	81,6	2,96	217,0	178,34	212,27	33,94
Sulfato ⁽²⁾	100,6	648,9	3,88	390,0	181,69	381,98	200,30
----- Solo Arenoso -----							
Elementar	60,5	67,2	3,12	188,40	151,29	186,04	34,75
Sulfato	92,5	597,0	3,50	323,90	167,15	319,91	152,76

(1) Enxofre Elementar: Sulfur (90% S); (2) Enxofre Sulfato: Gesso (15,5% S); (3) MEE: dose de enxofre para máxima eficiência econômica; (4) Fertilizante: dose dos produtos comerciais na MEE; (5) EUS: eficiência de uso do enxofre em kg de grãos por kg de nutriente aplicado; (6) Incremento de produção acumulada (soja+trigo+soja) na MEE; (7) Custo da adubação: Sulfur (90% S): 1880,00 R\$ Ton⁻¹ e aplicação: 25,00 R\$ ha⁻¹; Gesso (15,5% S): 240,00 R\$ Ton⁻¹ e aplicação: 40,00 R\$ Ton⁻¹; (8) Soja: 70,00 R\$ sc⁻¹; Trigo: 32,00 R\$ sc⁻¹ (preço maio/2018).

Fonte: Elaborada pelo autor, 2018.

Considerando o período avaliado de 3 cultivos (soja-trigo-soja), houve resposta econômica à adubação com diferentes fontes de fertilizantes contendo enxofre. A fonte de fertilizante contendo enxofre elementar (S 90) apresentou receita líquida foi de R\$ ha⁻¹ 33,94 e 34,75, respectivamente, nos solos argiloso e franco argiloso. A fonte de fertilizante contendo

enxofre sulfato (Gesso) apresentou receita líquida foi de R\$ ha⁻¹ 200,30 e 152,76, respectivamente, no solo argiloso e franco argiloso. É oportuno mencionar que associado ao maior custo por kg de S aplicado na fonte de fertilizante contendo S elementar, o retorno econômico é menor comparado à fonte de fertilizante contendo S sulfato. Esses resultados mostram que ambas as fontes tem resultados positivos quanto a sua aplicação, trazendo resultados financeiros ao produtor, além da melhoria das condições de solo.

O crescente uso de fertilizantes mais concentrados (ureia, superfosfato triplo, o monoamônio fosfato (MAP), diamônio fosfato (DAP)), que não possuem enxofre em sua composição, contribuir de maneira significativa no aumento da resposta a esse nutriente.

Sabe-se que a adubação é a prática que, tomada isoladamente, mais retorno traz em produtividade e rentabilidade para a cultura. Da mesma forma, se atribui a ela o maior custo da produção, representando em média 30% do custo total de produção (HANSEL et al, 2011).

Poucas pesquisas sobre o uso do enxofre como fonte de nutriente às plantas têm sido realizadas no Brasil. Horowitz (2006) demonstrou que 42 amostras de solo de diferentes regiões do Brasil têm capacidade de oxidar S-elementar, porém com variáveis taxas de oxidação. Além disto, o mesmo autor, trabalhando em casa de vegetação com quatro cultivos consecutivos comprovou que fontes de S-elementar tiveram baixa eficiência. 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 do superfosfato simples (fonte de S padrão). Estes resultados convergem com os apresentados no qual a utilização de diferentes fontes de enxofre apresentam potencial de utilização em áreas com níveis adequados do nutriente, porém que necessitam de reposição de enxofre.

Hansel et al (2011) encontrou incremento de rendimento devido a adubação representando um retorno econômico bruto de R\$ 814,00 por hectare para o uso de fertilizantes contendo enxofre na suas duas fontes, sulfato e elementar. O que pode-se observar é a uma agricultura cada vez mais eficiente, onde os resultados serão fatores decisivos e só serão justificados com aumento de produtividades, então visto toda a importante e benefícios do nutriente enxofre justifica seu uso e fica a necessidade de mais estudos e continuação desde trabalho.

A produtividade da soja no Brasil teve um aumento significativo. Nessas maiores produtividades, a soja estaria requerendo melhores condições de fertilidade. Os altos rendimentos de soja observados recentemente foram alcançados com suprimento de S via

adubo. Experimentos conduzidos pela Embrapa Soja (2017) revelam aumentos da ordem de 100 a 500 kg/ha em resposta à aplicação nos solos de quantidades entre 25 a 75 kg/ha de S.

Podemos afirmar que boa parte dos solos do território brasileiro apresentam condições favoráveis para utilização de fertilizantes S-elementar e S-sulfato, sendo aplicado para adubação de reposição ou manutenção, devido aos altos níveis de produtividade. Acredita-se que existe necessidade de novas pesquisas sobre o tema, uma sugestão seria a fabricação de fertilizantes granulados que contenham S-elementar, possibilitando a obtenção de fórmulas com altas concentrações em NPK e em enxofre, o que resultaria numa significativa redução de custos ao produtor. Para Osorio-Filho (2006) a cultura da soja semeada sobre os resíduos de aveia preta cultura de cobertura, a qual apresentou elevada produção de massa seca onde possivelmente, a quantidade de S disponibilizada pela mineralização dos resíduos dessa cultura ao longo do ciclo da soja promoveu o fornecimento deste elemento para a leguminosa, mesmo nas parcelas testemunhas. Assim, ciclagem de S teria contribuído na ausência de resposta na cultura da soja.

A soja tem apresentado respostas à aplicação de S em latossolos altamente intemperizados do cerrado brasileiro. A aplicação de gesso agrícola proporcionou aumentos de 350 a 485 kg ha⁻¹ de grãos em diversos latossolos.

4.3 Incremento dos Teores de Enxofre no Solo

A caracterização do efeito residual das fontes e doses de enxofre nos incrementos dos teores de enxofre no solo, após 6 e 18 meses após a aplicação dos fertilizantes, nas camadas 0 a 20, 20 a 40 e 40 a 60 cm de profundidade, são apresentadas nas figuras 7, 8 e 9. Pode-se observar na figura 7, os primeiros seis meses, depois de aplicado os fertilizantes contendo enxofre, onde temos um incremento superior para as duas classe solo argiloso e franco argiloso da fonte sulfato, em todo o perfil de 0-20, 20-40 e 40-60cm e em todas as doses gradativamente. Rampim et al. (2013) e Basso et al. (2015) também observaram valores mais elevados de enxofre nas doses mais altas na camada mais superficial do solo. Estes resultados condizem com os encontrados por Rampim et. al. (2013) que a adição de gesso acrescentou enxofre no solo nas camadas de 0,20-0,40 m logo aos seis meses.

Os incrementos dos teores de enxofre na fonte elementar são menores, visto a necessidade de oxidação deste, porém mesmo sendo inferior a fonte sulfato se mantém responsivo ao aumento de dose em ambos os solos analisados. O entendimento do processo

de mineralização do S é de grande importância, pois a disponibilidade de SO_4^{-2} às plantas só é possível pela mineralização do S nos solos. Sendo, essa influenciada por fatores ambientais e de solo (ALVAREZ, 2004). Entre os fatores ambientais e edáficos destacam-se a temperatura, a umidade, a aeração, o pH, a população microbiana e as formas predominantes de S orgânico. Os fatores ambientais afetam a população e a atividade microbiana e esta influencia na mineralização, pois, utilizam a matéria orgânica como substrato para seu crescimento e, se sobrar S do seu metabolismo, disponibilizam o enxofre às culturas. Nesse sentido, encontramos resposta para a grande diversidade dos resultados encontrados.

A aplicação de S gera resposta temporária nos níveis deste elemento no solo, mas sem efeito residual de um ano para o outro, pois o íon S é lixiviado rapidamente (NEIS et al., 2010).

Figura 13. Incremento dos teores de enxofre em solo argiloso (A) 0-20cm, (B) 20-40cm, (C) 40-60cm após corridos 6 meses de instalação do experimento.

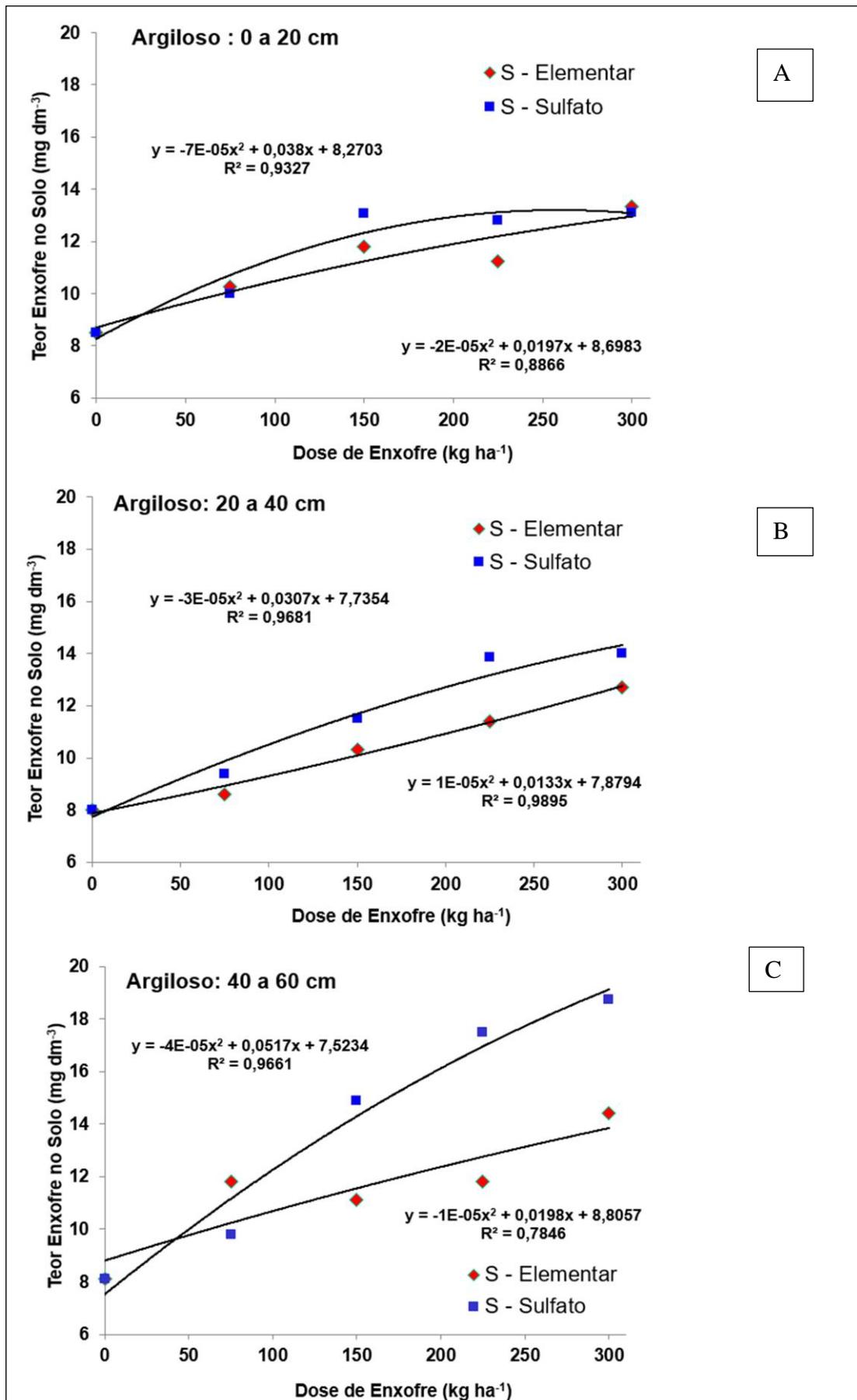


Figura 14. Incremento dos teores de enxofre em solo franco argiloso (A) 0-20cm, (B) 20-40cm, (C) 40-60cm após corridos **6 meses** de instalação do experimento.

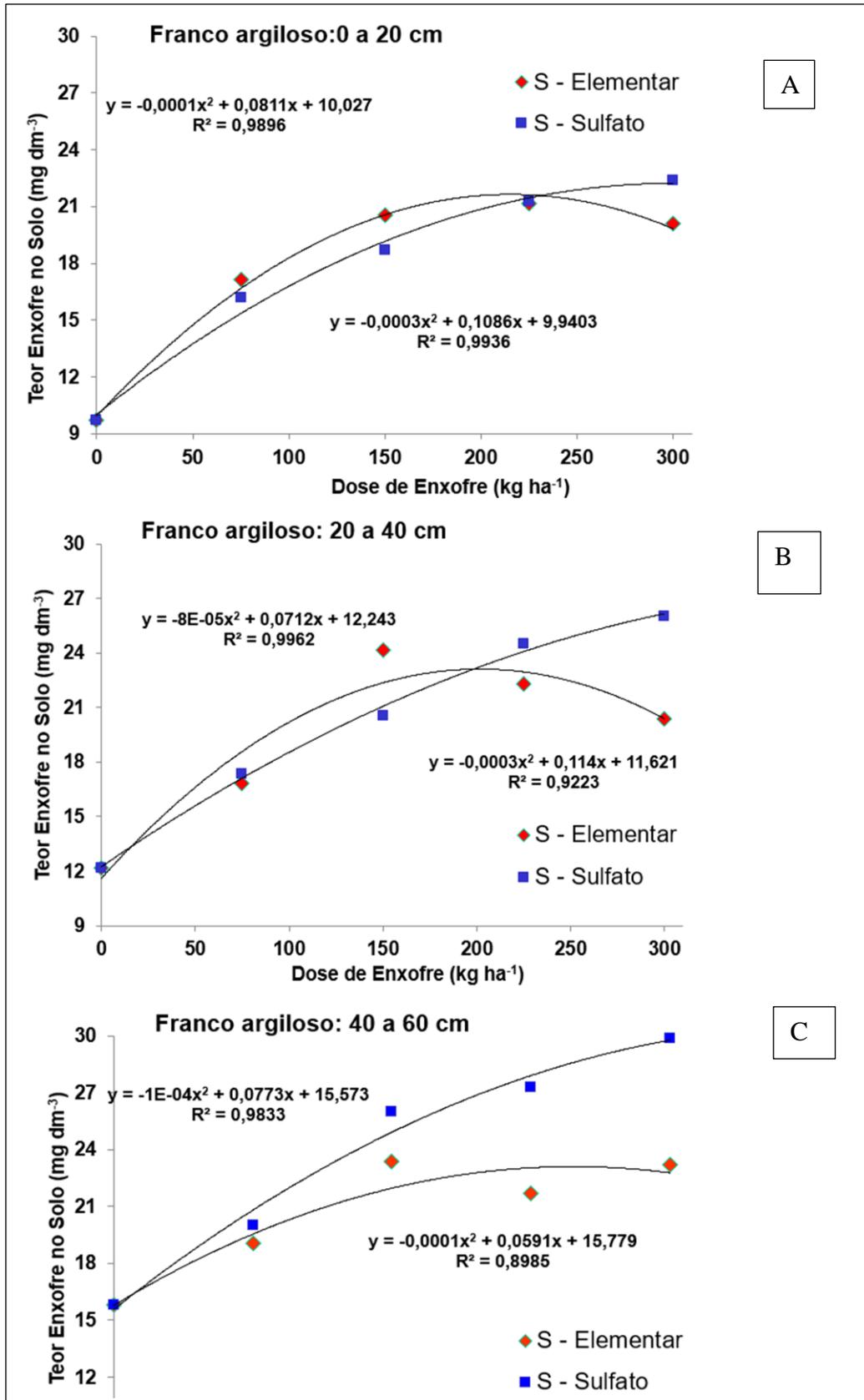


Figura 15. Incremento dos teores de enxofre em solo argiloso (A) 0-20cm, (B) 20-40cm, (C) 40-60cm após corridos **18 meses** de instalação do experimento.

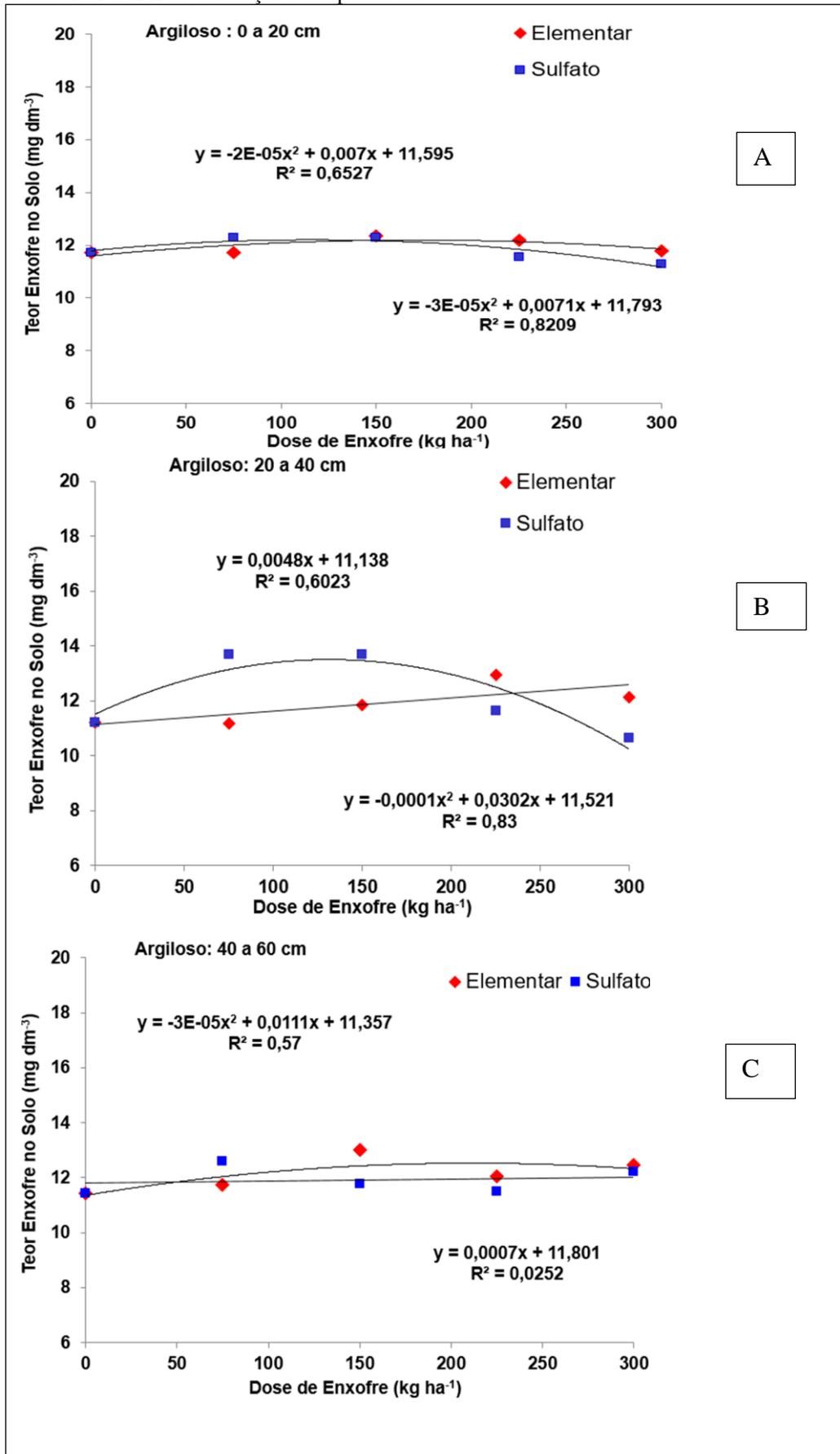
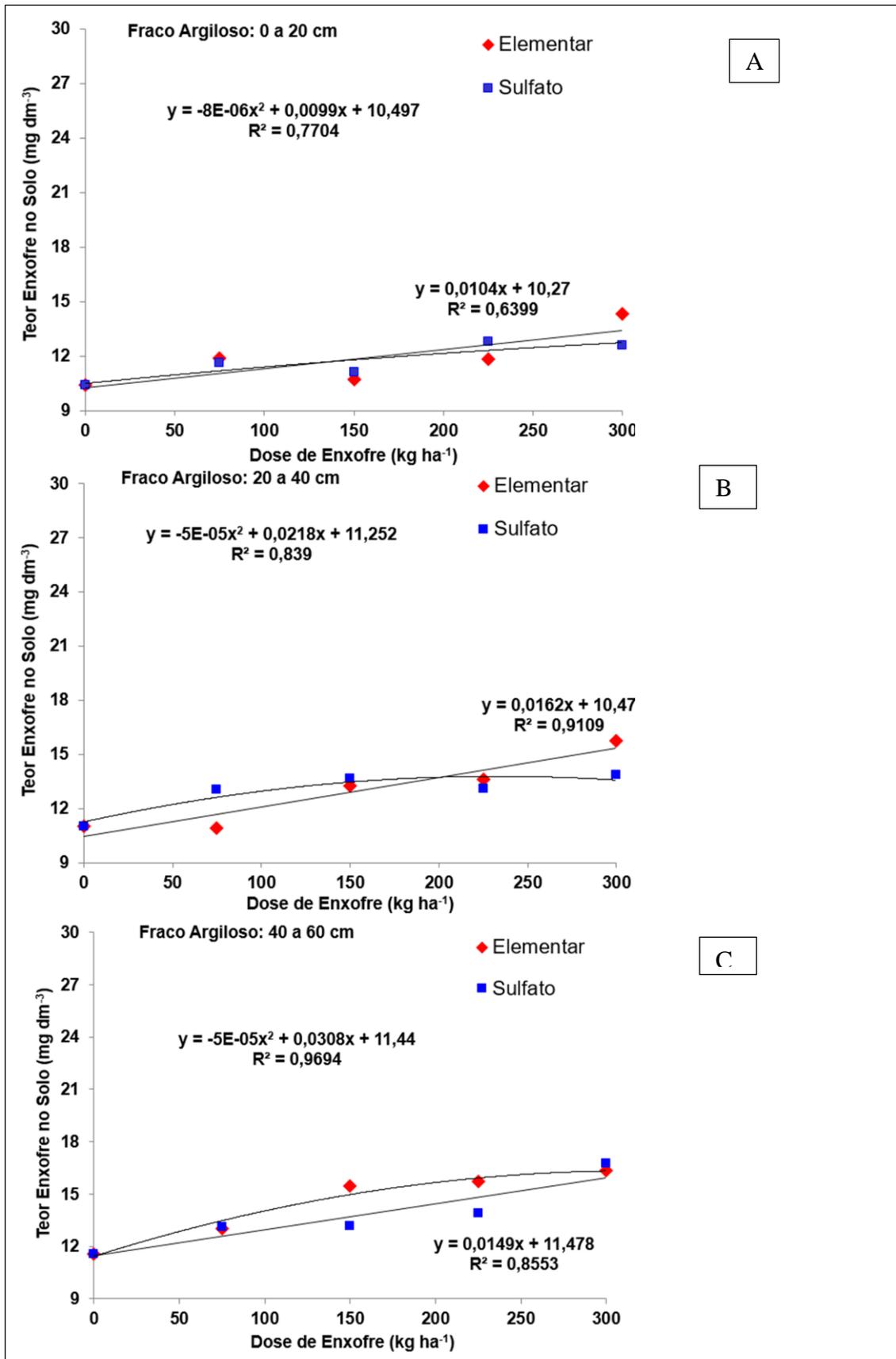


Figura 16. Incremento dos teores de enxofre em solo franco argiloso (A) 0-20cm, (B) 20-40cm, (C) 40-60cm após corridos **18 meses** de instalação do experimento.



A figura 17 apresenta os incrementos dos teores de enxofre no solo na camada de 0 a 20 cm aos 6 meses após a aplicação de doses de enxofre, comparativamente com fertilizantes contendo enxofre sulfato e elementar nos solos textura argilosa e franco.

Figura 17. Aumento dos teores de enxofre na fonte de sulfato, após 6 meses de 0-20 cm, para os dois teores tipos de solo Argila 50 a 55% e Argila 30 a 35%.

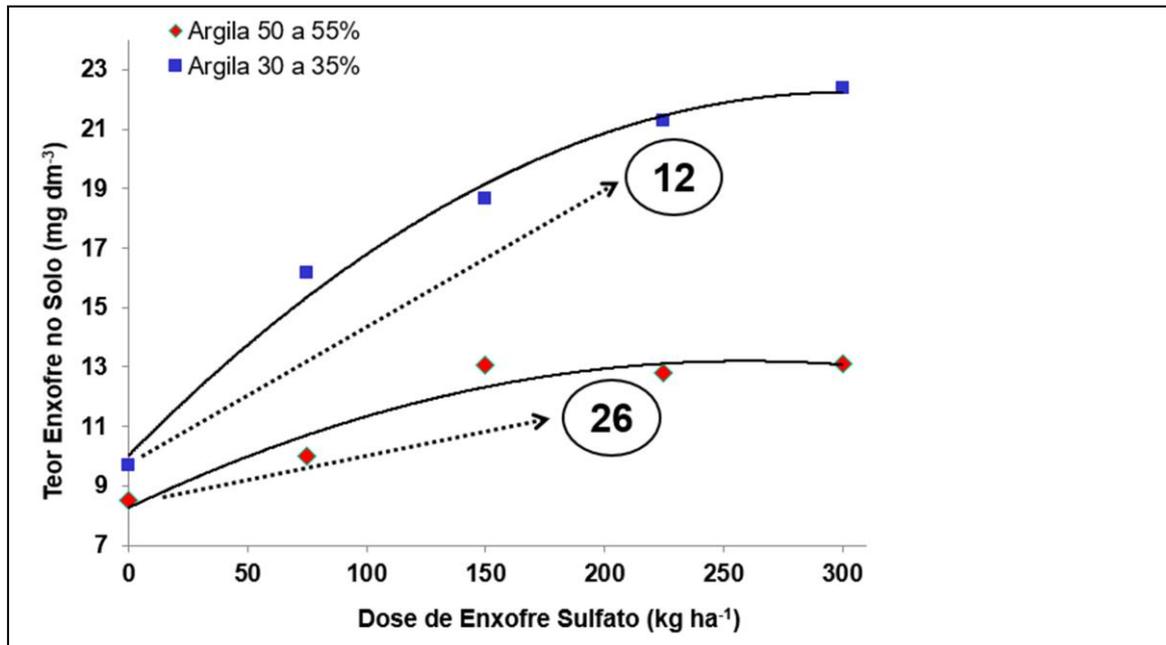
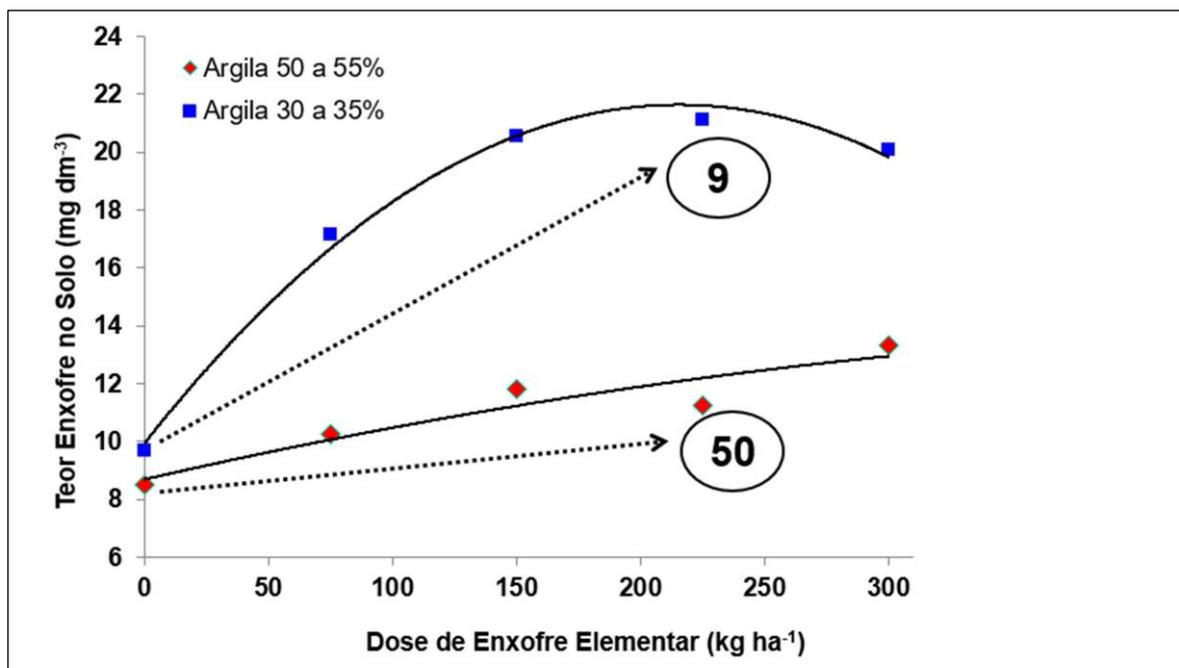


Figura 18. Aumento dos teores de enxofre na fonte de elementar, após 6 meses de 0-20 cm, para os dois teores tipos de solo Argila 50 a 55% e Argila 30 a 35%.



Observa-se que utilizando fertilizantes contendo enxofre a base de sulfato (figura 17), o incremento de enxofre avaliado pela análise de solo após 6 meses da aplicação, necessita-se de 26 e 12 kg ha⁻¹ de enxofre, respectivamente para o solo argiloso e franco argiloso. Quando se utiliza fertilizantes contendo enxofre elementar (figura 18), observa-se que o incremento de enxofre avaliado pela análise de solo após 6 meses da aplicação, necessita-se de 50 e 26 kg ha⁻¹ de enxofre, respectivamente para o solo argiloso e franco argiloso.

Esse parâmetro tem uma grande importância para o manejo da adubação sulfatada, visto que se torna a referência para definição de doses de enxofre no processo de correção, expressão quantos kg de enxofre são necessários aplicar para elevar 1 mg dm⁻³ de enxofre na análise do solo. Convém ressaltar que, a análise do solo, promove a extração e determinação do enxofre predominantemente na forma de sulfato.

No solo argiloso devido ao maior número de sítios e destes possuem uma maior força de adsorção de ânions, ocorre um incremento menor dos teores de enxofre, bem como a necessidade de maior quantidade de enxofre a ser aplicado para a elevação dos teores no solo, expresso pela extração por ocasião da análise do solo.

Por outro lado, no solo arenoso, devido ao menor número de sítios e destes possuem uma menor força de adsorção de ânions, ocorre um incremento maior dos teores de enxofre no solo, bem como a necessidade de menor quantidade de enxofre a ser aplicado para a elevação dos teores no solo, expresso pela extração por ocasião da análise do solo.

Entretanto, na condição em que se utilizou o enxofre elementar, existe um comportamento diferenciado atribuído ao tempo necessário para que ocorra a oxidação do enxofre elementar até sulfato, bem como da sua velocidade diferenciada entre o solo argiloso e franco argiloso. Considerando que foi avaliado aos 6 meses após a aplicação, no solo argiloso teve-se uma necessidade de uma quantidade aumentada de enxofre aplicado quando comparado ao uso do enxofre na forma sulfato, provavelmente atribuído que uma parte significativa do enxofre aplicado na forma elementar ainda não se transformou para sulfato.

Por outro lado, no solo franco argiloso, a quantidade de enxofre necessário aplicar para elevar 1 mg dm⁻³ de enxofre na análise do solo, foi semelhante entre a fonte sulfato e elementar, provavelmente associado, a condição de oxidação mais rápida do enxofre elementar no solo franco argiloso.

É oportuno mencionar que a avaliação dos incrementos dos teores de enxofre no solo em camadas de solo mais profundas e a tempos maiores após a aplicação, não foi possível, devido a dificuldade de prever o comportamento do enxofre no solo. Isso está atribuído, a dinâmica complexa tanto do processo de lixiviação do enxofre, quer seja do aplicado na forma

de sulfato, quer seja do enxofre oxidado a sulfato a partir da aplicação do elementar.

Devido a intensa lixiviação do enxofre na forma de sulfato, na adubação inorgânica de S não se deve aplicar altas doses com a finalidade de elevar o teor do nutriente no solo prevendo uma disponibilidade por vários anos, principalmente em solos com baixo teor de argila, pH em água próximo à neutralidade e alto teor de fósforo. Também, ao se cultivar espécies com alta exigência em S, a aplicação do nutriente deve ser realizada concomitantemente à sementeira da cultura, com o intuito de manter a disponibilidade elevada de S no solo na zona de absorção das raízes pelo maior tempo possível durante o crescimento e o desenvolvimento das plantas.

De acordo com os resultados obtidos nessa pesquisa associado a complexidade de previsão do comportamento do enxofre no solo, 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 associadas à ocorrência de formas de S não acessadas pelo método de extração, taxas de desorção compatíveis com a necessidade da planta, à absorção de camadas mais profundas, taxas de mineralização dos resíduos vegetais e mesmo da matéria orgânica do solo e entrada de sulfato dissolvido na água da chuva.

Souza (2004) verificou produtividades de até 3.161 kg ha⁻¹ sem aplicação de enxofre e não havendo diferenças na produtividade aplicação de sulfato, contudo, ressalta que havia no solo elevados teores de enxofre. Nogueira e Melo (2003) não tiveram respostas na produtividade com doses de gesso, mas atribuíram este resultado aos teores de matéria orgânica no solo, que provavelmente, foi suficiente para suprir as necessidades da cultura.

Segundo estudos de Richart et al (2006) 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⁻³ de S. Estes teores são extremamente baixos, ou seja, não há praticamente S no solo na camada de 0–10 cm. Reforça, mais uma vez, a rapidez com que o íon sulfato é removido do perfil, e que mais atenção deve ser dada ao S, para que esse não venha a ser limitante às culturas, especialmente em solos com baixos teores de matéria orgânica, sua principal reserva.

Avaliando as alterações químicas do solo e a resposta da cultura da soja ao calcário e gesso aplicados na implantação do sistema de plantio direto em solo argiloso, Caires et al. (2003) concluíram que não houve resposta da soja, em três cultivos consecutivos. Os autores

verificaram que a aplicação de gesso agrícola, associada ou não à calagem, na superfície ou com incorporação, não foi uma estratégia interessante para o estabelecimento da soja no sistema plantio direto, por não ocasionar melhoria na disponibilização de nutrientes e na distribuição radicular no perfil do solo, não afetando a produção de grãos, em estudos relacionando à aplicação de S via solo e via foliar.

Para Broch et al. (2011) embora possa não haver resposta à aplicação de S em muitas áreas cultivadas pelo Brasil, é preciso ficar atento ao que acontece no solo, em função do S apresentar rápido deslocamento ao longo do perfil em profundidade, dando atenção especial para que a disponibilidade do elemento não possa se tornar limitante aos próximos cultivos. Nos dados obtidos pelos autores, após os três anos de experimento, pode-se observar que a fertilidade do solo, de um modo geral, melhorou na área cultivada até a profundidade avaliada (0 a 40 cm), com elevação nos teores disponíveis de P, K, Ca, Mg e também da saturação por bases. Com relação ao S também houve aumento na disponibilidade dele no solo segundo o autor, sendo que a disponibilidade é superior na camada de 20-40 cm em relação a 0-20 cm. Conhecendo o comportamento deste nutriente no solo, é de se esperar que a disponibilidade seja maior ainda nas camadas mais profundas, que não foram avaliadas no trabalho. Assim podemos afirmar que possivelmente teríamos uma melhor condição para o desenvolvimento radicular da cultura, melhorando a estrutura de solo.

5 CONCLUSÕES

- Em de 59% das análises realizadas de 2001 a 2016, demonstrando alta probabilidade de respostas à aplicação de fertilizantes contendo enxofre em diferentes regiões do Estado do RS;

- Considerando um período de 3 cultivos (soja-trigo-soja), houve resposta econômica à adubação sulfatada com doses de máxima eficiência econômica de 97 e 67 kg há⁻¹, respectivamente para enxofre na forma de sulfato e elementar;

- Houve incrementos dos teores de enxofre do solo na camada de 0 a 20 cm aos 6 meses após a aplicação, necessitando de 26 e 12 kg ha⁻¹ de enxofre na forma de sulfato e de 50 e 26 kg ha⁻¹ de enxofre na forma elementar, respectivamente para o solo argiloso e franco argiloso, para elevar 1 mg dm⁻³ de enxofre na análise do solo.

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, G. A. S. C.; AZAMBULA, R. S. L.; LINS, F. A. F. Capítulo 6 – **Agrominerais – Enxofre**. 2011. Disponível em: <http://pt.scribd.com/doc/37374957/06-agrominerais-enxofre>. Acesso: nov de 2016.

ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C.; GONÇALVES, J.L.M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, 22 (6): 711–728. 2013.

ALVAREZ, J. W.R. **Disponibilidade e resposta de culturas ao enxofre em solos do Rio Grande do Sul**. Santa Maria- RS. Dissertação de Mestrado. 2004.

ALVAREZ, V. H. *et al.* Enxofre. *In*: NOVAIS, R. F. *et al.* (Ed) **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: Sociedade, Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 595-644.

BARTH, G. FRANCISCO, E. SUYAMA, J. T. GARCIA, F. **Nutrient Uptake Illustrated for Modern, High-Yielding Soybean**. Better Crops/Vol. 102. N 01. 2018.

BLANCO, I. B.; **Adubação da cultura da soja com dejetos suínos e cama de aviário**. Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Dissertação de mestrado. Cascavel, PR. 2015.

BORKERT, C.M.; YORINORI; J.T.; CORRÊA-FERREIRA, B.S.; ALMEIDA, A.M. R.; FERREIRA, L.P.; SFREDO, G.J. **Seja o doutor da sua soja**. Informações Agronômicas, n. 66, 1994.

BRASIL. Departamento Nacional de Pesquisa Agropecuária. **Levantamento de Reconhecimento dos Solos do Rio Grande do Sul**. Recife. 1973. 431p. (Boletim Técnico,30)

BRASIL. MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Regras para análise de sementes** / Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. Brasília: MAPA/ACS, 2009. 399p.

BROCH; D.L.; PAVINATO; P.S.; POSSENTTI; J.C. ; MARTIN; T.N.; DEL QUIQUI; E.M. **Produtividade da soja no cerrado influenciada pelas fontes de enxofre.** Rev. Ciênc. Agron. vol.42 no.3 Fortaleza July/Sept. 2011.

CAIRES, E. F. *et al.* **Alterações químicas do solo e resposta da soja ao calcário e gesso aplicados na implantação do sistema plantio direto.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 27, n. 02, 2003. p. 275-286.

CAIRES, E. F.; FONSECA, A. F. **Absorção de nutrientes pela soja cultivada no sistema de plantio direto em função da calagem na superfície.** Bragantia, Campinas, v. 59, n. 2, p. 213-320, 2000.

CANTERI, M. G., ALTHAUS, R. A., VIRGENS FILHO, J. S., GIGLIOTI, E. A., GODOY, C. V. SASM - Agri : Sistema para análise e separação de médias em experimentos agrícolas pelos métodos Scott - Knott, Tukey e Duncan. **Revista Brasileira de Agrocomputação**, v.1, n.2, p.18-24. 2001.

CASAGRANDE, J.C.; ALLEONI, L.R.F.; CAMARGO, O.A.; BORGES, M. **Adsorção de fosfato e sulfato em solos com cargas elétricas variáveis.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.27, p.51- 57, 2003.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO - RS/SC. **Manual de adubação e de calagem para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina.** 10ª ed. Porto Alegre: SBCS - Núcleo Regional Sul: UFRGS, 2016. p.400.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**, v. 4, Safra 2016/17, n.10, Brasília, julho 2018.p.09.

CREMON, C. ROSA JÚNIOR, E.J. SERAFIM, M.E. ONO, F.B. **Análise micromorfológica de agregados de um Latossolo Vermelho distroférico em diferentes sistemas de manejo.** Acta Scientiarum Agronomy, Maringá, v. 31, n. 1, p. 1399-146, 2009.

DALLA NORA, D.; AMADO, T.J.C. **Improvement in Chemical Attributes of Oxisol Subsoil and Crop Yields under No-Till.** Agronomy Journal, v. 105 p. 1393-1403, 2013.

DOMINGOS, C. S.; LIMA, L. H. S.; BRACCINI, A. L. **Nutrição mineral e ferramentas para o manejo da adubação na cultura da soja.** Scientia Agrária Paranaensis, Marechal Cândido Rondon, v. 14, n. 3, jul/set., p.132-140, 2015.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA), Centro Nacional de Pesquisa Soja. **A Soja no Brasil**. Disponível em: www.cnpso.embrapa.br/producaosoja/SojanoBrasil.htm. Acesso em: 12 dez. 2017.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Tecnologias de Produção de Soja Região Central do Brasil**. Sistema de Produção, 1, Versão eletrônica, Jan/2003. Disponível em: <<http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br>>. Acesso em: 13 de novembro 2016.

EPSTEIN, E.; BLOOM, A. **Nutrição mineral de plantas: princípios e perspectivas**. 2. ed. Londrina: Planta, 2006.

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

FREITAS, M. C. M. **A cultura da soja no Brasil: o crescimento da produção brasileira e o surgimento de uma nova fronteira agrícola**. ENCICLOPÉDIA BIOSFERA, Centro Científico Conhecer - Goiânia, vol.7, N.12; 2011.

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

GOLDBERG, S. **Competitive Adsorption of Molybdenum in the Presence of Phosphorus or Sulfur on Gibbsite**. Soil Science, v.175, p.105-110, 2010.

HANSEL, F. D. AMADO, T. J. C. FERREIRA, A. O. TRINDADE, B. S. TEIXEIRA, T. G. **Resposta da soja às inovações tecnológicas na área de fertilizantes**. Enciclopédia biosfera, Centro Científico Conhecer - Goiânia, vol.7, N.13; 2011.

HOROWITZ, N.; MEURER, E.J. **Oxidação do enxofre elementar em solos tropicais**. Ciência Rural, Santa Maria, v. 36, n. 3, 2006. p. 822-828.

LARA, I.C.V. MOREIRA, A. CABRERA, R.A.D. MORAES, L.A.C. **Eficiência agrônômica de fontes e doses de fósforo no cultivo da soja em solos com diferentes classes texturais**. XII Jornada Acadêmica da Embrapa Soja. Londrina, ed.1, 2017. p. 76-80.

MALAVOLTA, E.; MORAIS, M.F. **Fundamentos do nitrogênio e do nitrogênio e enxofre na nutrição de plantas cultivadas**. In: Yamada, T.; Abdalla, S.R.S.; Vitti, G.C. (Eds.). Nitrogênio e enxofre na agricultura brasileira, Piracicaba: IPNI, 2007. p.189-249.

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.

NEIS, L. et al. **Gesso agrícola e rendimento de grãos de soja na região do sudoeste de Goiás.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 34, n. 02, 2010, p. 409-416.

NOGUEIRA, M. A.; MELO, W. J. **Enxofre disponível para a soja e atividade de arilsulfatase em solo tratado com gesso agrícola.** Revista Brasileira de Ciências do Solo, Viçosa, v. 27, n. 4, 2003, p. 655-663.

NZIGUHEBA, G; SMOLDERS, E; MERCKX, R. **Sulphur immobilization and availability in soils assessed using isotope dilution.** Soil Biology & Biochemistry, v. 37 p.635–644, 2005.

O FUTURO DO AGRONEGOCIO BRASILEIRO. Revista Plantar. Editora Monterio. Ano VII. ed.48.2011.

OSÓRIO FILHO, B.D.; RHEINHEIMER, D.S.; SILVA, L.S.; KAMINSKI, J.; DIAS, G.F. **Deposição do enxofre atmosférico no solo pelas precipitações pluviárias e respostas de culturas à adubação sulfatada em sistema plantio direto.** Ciência Rural, v.37, p.712- 719, 2007.

OSÓRIO-FILHO, B. D. **Dinâmica de enxofre no sistema solo e resposta das culturas à adubação sulfatada.** 2006. 75 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2006.

PAVAN, M.A; VOLKWEISS, S.J. **Efeitos do gesso nas relações solo-planta: princípios.** In: Seminário sobre o uso do fosforo gesso na agricultura, 1., 1985, Brasília. Anais... Brasília, DF: EMBRAPA-DDT, 1986. p.107-118.

PEREIRA, C. S.; FREITAS, A. A.; CHAPLA, M. V.; LANGE, A. **Doses de potássio com a presença de enxofre na cultura da soja.** Gl. Sci Technol, Rio Verde, v.09, n.01, p.22 – 32, jan/abr. 2016.

POZZA, A.A.A.; CURTI, N.; GUILHERME, L.R.G.; MARQUES, J.J.G.S.M.; ENIO T. S.; COSTA, E.T.S.; ZULIANI, D.Q.; MOTTA, P.E.F.; MARTINS, R.S.; OLIVEIRA, L.C.A. **Adsorção e dessorção aniônicas individuais por gibbsita pedogenética.** Química Nova, v.32, p. 99-105, 2009.

PRIMIERY, B. F.; SANTOS, R. F. **Solo, adubação e nutrição da cultura da soja (*Glycine max L.*)**. Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Cascavel –PR. Edição Especial: II Seminário de Engenharia de Energia na Agricultura Acta Iguazu, v. 6, n. 5, p. 80-91, 2017.

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**. Pesq. Agropec. Bras., 1993.

RAIJ, B.V.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. In: MASCARENHAS, A. A.; TANAKA, R. T.; **Boletim Técnico 100 Recomendações de Adubação e Calagem para o Estado de São Paulo**. FUNDAG, 2 Ed., 1996. p. 202-203.

REUNIÃO DA COMISSÃO BRASILEIRA DE PESQUISA DE TRIGO E TRITICALE (9.: 2015:Passo Fundo, RS). **Informações técnicas para trigo e triticales - safra 2016**. Passo Fundo, RS: Biotrigo Genética, 2016. 228p.

REUNIÃO DE PESQUISA DE SOJA DA REGIÃO SUL (41.:2016:Passo Fundo, RS). **Indicações técnicas para a cultura da soja no Rio Grande do Sul e em Santa Catarina safras 2016/2017 e 2017/2018**. Passo Fundo: FAMV-PPG Agro/UPF-APASSUL, 2016. 127p.

RHEINHEIMER, D. S. *et al.* **Resposta de culturas à aplicação de enxofre e a teores de sulfato num solo de textura arenosa sob plantio direto**. Ciência Rural, v. 35, n. 03, 2005. p. 562-569.

RICHART, A.; LANA, M. C.; SCHULZ, L.R.; BERTONI, J.C.; BRACCINI, A. L.; **Disponibilidade de fósforo e enxofre para a cultura da soja na presença de fosfato natural reativo, superfosfato triplo e enxofre elementar**. Rev. Bras. Ciênc. Solo vol.30 no.4 Viçosa July/Aug. 2006.

ROSSETTO, R.; SANTIAGO, A. D. **Gessagem**. Agencia Embrapa de Informação Tecnológica-Ageitec. 2011. Disponível em: https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-deacucar/arvore/CONTAG01_35_711200516717.html > Acesso em: 04 dez. 2016.

SILVA, A. N.; FIORIN, J. R.; REBELATO, S. DA S.; NOWICKI, A.; COLLING, A. **Diagnóstico dos teores de enxofre extraível no solo das áreas de agricultura de precisão no Rio Grande do Sul**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 34. Anais... SBCS: 28 de julho a 02 de agosto de 2013. Florianópolis, SC.

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, v.37, n.8, p.1161-1167, 2002.

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

STIPP, S. R.; CASARIN, V. **A importância do enxofre na agricultura brasileira**. Informações Agrônômicas, Campinas, v.129, 2010. p.14-20.

SFREDO, G. J.; LANTMANN, A. F. **Enxofre nutriente necessário para maiores rendimentos da soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2007. 6 p. (Embrapa Soja. Circular técnica, 53).

TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C. A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S. J. **Análises de solo, plantas e outros materiais**. 2 ed. Porto Alegre: UFRGS/Departamento de Solos, 1995. 174p. (Boletim Técnico, 5).

TIECHER, T. RHEINHEIMER, D.S.; RASCHE, J.W.A.; BRUNETTO, G.; MALLMANN, F.J.K; PICCIN, R. **Resposta de culturas e disponibilidade de enxofre em solos com diferentes teores de argila e matéria orgânica submetidos à adubação sulfatada**. Bragantia vol.71 n°4, Campinas 2012.

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**. Pesq. agropec. bras., v.42, n.2, 2007. p. 225-229.

WAINWRIGHT, M. **Sulfur oxidation in soils**. Advances in Agronomy, San Diego, CA, v. 37, p. 349-396, 1984.

ZAMBOLIM, L.; VENTURA, J. A.; JUNIOR, L. A. Z. **Efeito da nutrição mineral no controle de doenças de plantas**. Universidade Federal de Viçosa – Departamento de Fitopatologia, Viçosa, MG, 327. p, 2012.

ZANDONA, R. R.; BEUTLER A. N.; BURG, G. M.; BARRETO, C. F.; SCHMIDT, M. R. **Gesso e calcário aumentam a produtividade e amenizam o efeito do déficit hídrico em milho e soja**. Pesq. Agropec. Trop., Goiânia, v. 45, n. 2, abr./jun. 2015. p. 128-137.

APÊNDICES

APÊNDICE A Produtividade de grãos de soja safra 2016/2017, trigo safra 2017, soja safra 2017/2018 e produtividade acumulada em resposta à diferentes fontes e doses de fertilizantes contendo enxofre em solo argiloso. Cruz Alta, RS. 2018.

Doses	Produtividade Soja 2016/2017			Produtividade Trigo 2017			
	Enxofre	Elementar	Sulfato	Média	Elementar	Sulfato	Média
0		3844	3844	3844	3522	3522	3522
75		3889	3888	3889	3677	3615	3646
150		3796	3875	3836	3663	3659	3661
225		3953	3825	3889	3733	3705	3719
300		3840	3861	3851	3737	3613	3675
Média		3865	3859	3862	3666	3623	3644
F Trat. Fonte		0,023 ns			0,592 ns		
F Trat. Dose		0,402 ns			1,352 ns		
F Interação		0,881 ns			0,162 ns		
C. V. (%)		3,30			5,49		
Doses	Produtividade Soja 2017/2018			Produtividade Acumulada			
	Enxofre	Elementar	Sulfato	Média	Elementar	Sulfato	Média
0		4586	4586	4586	11952	11952	11952
75		4614	4676	4645	12180	12179	12180
150		4739	4758	4748	12198	12292	12245
225		4722	4721	4721	12408	12250	12329
300		4744	4640	4692	12321	12114	12217
Média		4681	4676	4678	12212	12157	12185
F Trat. Fonte		0,009 ns			0,368 ns		
F Trat. Dose		1,161 ns			1,990 ns		
F Interação		0,258 ns			0,386 ns		
C. V. (%)		4,05			2,60		

ns – não significativo ao nível de 5% de probabilidade.

APÊNDICE B. Peso de cem sementes (PCS) de soja safra 2016/2017, peso do hectolitro (PH) de trigo safra 2017, PCS, número de vagens por planta (Vag./Pl.), número de grãos por planta (Grão/Pl.), número de vagens com ≥ 3 grãos (Vag. ≥ 3) de soja safra 2017/2018 em resposta à diferentes fontes e doses de fertilizantes contendo enxofre em solo argiloso. Cruz Alta, RS. 2017.

Doses Enxofre	Peso Cem Sementes Soja 2016/2017			Peso Hectolitro Trigo 2017			Peso Cem Sementes Soja 2017/2018		
	Elementar	Sulfato	Média	Elementar	Sulfato	Média	Elementar	Sulfato	Média
0	15,2	15,2	15,2	72,5	72,5	72,5	19,0 A a	19,0 A a	19,0
75	15,3	15,4	15,4	73,2	73,1	73,1	18,7 B a	19,3 A a	19,0
150	15,1	15,4	15,2	74,0	73,7	73,9	19,2 A a	19,0 A a	19,1
225	15,3	15,1	15,2	73,3	73,3	73,3	19,1 A a	19,2 A a	19,2
300	15,2	15,2	15,2	73,2	73,3	73,3	19,3 A a	18,9 A a	19,1
Média	15,2	15,3	15,3	73,2	73,2	73,2	19,1	19,0	19,1
F Trat. Fonte		0,023 ns			0,073 ns			0,135 ns	
F Trat. Dose		0,160 ns			1,741 ns			0,327 ns	
F Interação		0,521 ns			0,038 ns			2,685 *	
C. V. (%)		2,45			1,65			1,82	
Doses Enxofre	Número de vagens por planta			Número de grãos por planta			Número de vagens com ≥ 3 grãos		
	Elementar	Sulfato	Média	Elementar	Sulfato	Média	Elementar	Sulfato	Média
0	213	213	213	477	477	477	86	86	86
75	210	221	215	466	488	477	80	80	80
150	201	193	197	440	425	433	73	74	74
225	225	212	218	501	484	492	89	87	88
300	220	204	212	493	448	470	87	76	82
Média	213	209	211	476	464	470	83	81	82
F Trat. Fonte		0,343 ns			0,102 ns			0,003 ns	
F Trat. Dose		1,094 ns			1,258 ns			1,352 ns	
F Interação		0,508 ns			0,595 ns			0,617 ns	
C. V. (%)		11,90			13,34			18,24	

ns – não significativo ao nível de 5% de probabilidade.

APÊNDICE C Produtividade de grãos de soja safra 2016/2017, trigo safra 2017, soja safra 2017/2018 e produtividade acumulada em resposta a diferentes fontes e doses de fertilizantes contendo enxofre em solo fraco argiloso. Cruz Alta, RS. 2018.

Doses Enxofre	Produtividade Soja 2016/2017			Produtividade Trigo 2017		
	Elementar	Sulfato	Média	Elementar	Sulfato	Média
0	3571	3571	3571	2801	2801	2801
75	3540	3559	3550	2808	2816	2812
150	3657	3569	3613	2829	2838	2834
225	3505	3666	3585	2880	2865	2873
300	3542	3576	3559	2829	2827	2828
Média	3563	3588	3576	2847	2830	2838
F Trat. Fonte		0,185 ns			0,082 ns	
F Trat. Dose		0,143 ns			0,443 ns	
F Interação		0,463 ns			0,123 ns	
C. V. (%)		5,82			7,65	
Doses Enxofre	Produtividade Soja 2017/2018			Produtividade Acumulada		
	Elementar	Sulfato	Média	Elementar	Sulfato	Média
0	3393	3393	3393	9766	9766	9766
75	3456	3481	3468	9804	9856	9830
150	3610	3634	3622	10096	10041	10068
225	3529	3531	3530	10002	10062	10032
300	3536	3430	3483	9907	9832	9869
Média	3505	3494	3499	9915	9911	9913
F Trat. Fonte		0,027 ns			0,0009 ns	
F Trat. Dose		1,207 ns			0,9546 ns	
F Interação		0,125 ns			0,0512 ns	
C. V. (%)		6,93			4,28	

ns – não significativo ao nível de 5% de probabilidade.

APÊNDICE D - Peso de cem sementes (PCS) de soja safra 2016/2017, peso do hectolitro (PH) de trigo safra 2017, PCS, número de vagens por planta (Vag./Pl.), número de grãos por planta (Grão/Pl.), número de vagens com ≥ 3 grãos (Vag. ≥ 3) de soja safra 2017/2018 em resposta à diferentes fontes e doses de fertilizantes contendo enxofre em solo fraco argiloso. Cruz Alta, RS. 2017.

Doses Enxofre	Peso Cem Sementes Soja 2016/2017			Peso Hectolitro Trigo 2017			Peso Cem Sementes Soja 2017/2018		
	Elementar	Sulfato	Média	Elementar	Sulfato	Média	Elementar	Sulfato	Média
0	15,5	15,5	15,5	74,2	74,2	74,2	15,4	15,4	15,4
75	15,6	15,1	15,4	74,3	75,2	74,8	15,5	15,3	15,4
150	15,4	15,4	15,4	74,5	75,0	74,8	15,8	15,8	15,8
225	15,6	15,3	15,5	74,5	75,0	74,8	15,5	15,7	15,6
300	15,5	15,4	15,4	73,7	74,8	74,2	15,1	15,4	15,2
Média	15,5	15,3	15,4	74,3	74,8	74,6	15,5	15,5	15,5
F Trat. Fonte		2,819 ns			4,701 ns			0,009 ns	
F Trat. Dose		0,174 ns			0,955 ns			2,384 ns	
F Interação		0,605 ns			0,550 ns			0,347 ns	
C. V. (%)		2,24			1,3			3,03	
Doses Enxofre	Número de vagens por planta			Número de grãos por planta			Número de vagens com ≥ 3 grãos		
	Elementar	Sulfato	Média	Elementar	Sulfato	Média	Elementar	Sulfato	Média
0	258	258	258	627	627	627	137	137	137
75	264	250	257	641	603	622	142	129	135
150	266	250	258	637	602	620	138	133	135
225	253	274	263	615	671	643	134	149	141
300	250	236	243	598	571	584	126	124	125
Média	258	254	256	624	615	619	135	134	135
F Trat. Fonte		0,007 ns			0,006 ns			0,071 ns	
F Trat. Dose		0,861 ns			0,982 ns			0,925 ns	
F Interação		1,426 ns			1,221 ns			0,864 ns	
C. V. (%)		9,90			11,09			14,78	

ns – não significativo ao nível de 5% de probabilidade.

