



**JOÃO RENATO RODRIGUES ANTONIO**

**INTERAÇÃO ENXOFRE × SELÊNIO NA PRODUÇÃO DA  
SOJA**

**LAVRAS – MG 2022**

**JOÃO RENATO RODRIGUES ANTONIO**

# **INTERAÇÃO ENXOFRE × SELÊNIO NA PRODUÇÃO DA SOJA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à

Universidade Federal de Lavras, como parte  
das exigências do Curso de Agronomia, para a  
obtenção do título de Bacharel.

Prof.<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup>. Maria Ligia de Souza Silva  
Orientadora

**LAVRAS – MG 2022**  
**JOÃO RENATO RODRIGUES ANTONIO**

**INTERAÇÃO ENXOFRE × SELÊNIO NA PRODUÇÃO DA SOJA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à

Universidade Federal de Lavras, como parte  
das exigências do Curso de Agronomia, para a  
obtenção do título de Bacharel.

MSc. Amanda Santana Chales - UFLA

Dr. Arnon Afonso de Souza Cardoso - UFLA

Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Maria Ligia de Souza Silva  
Orientadora

**LAVRAS – MG 2022**

*“Nasci para satisfazer a grande necessidade que eu tinha de mim mesmo.”*

*Jean-Paul Sartre*

## AGRADECIMENTOS

Ao meu pai, Manoel Clementino Antonio, por toda dedicação na minha criação e por sempre acreditar, amparar e estar comigo.

Aos meus avós, José Antonio e Lavinia, que sempre me estimularam e acreditavam no meu potencial.

Ao meu Tio João e a minha Tia Rose, pelo cuidado, companheirismo e apoio durante essa caminhada.

Aos meus amigos, irmãos de coração, Luiz, Vanessa e Erick que me acolheram durante minha estadia em Lavras dentro de suas casas, me fazendo sentir parte da família.

Ao meu grande amigo/irmão brotense de todas as horas, Murilo Pessa.

A minha namorada, Izaara, por todo carinho e apoio em cada nova jornada.

Aos meus amigos Eduardo, Miguel, Thiago, Victor Hugo, Renan, Hugo, Victor, Giuliana, Ana Júlia, Maíra e Geovani.

Aos amigos do Núcleo de Estudos em Ciência do Solo – NECS, por todo companheirismo e conhecimento compartilhado durante 3 anos e 5 meses como membro do grupo.

À professora Maria Ligia, pela orientação, pela confiança, compreensão, conhecimento e por todo apoio que me foi dado ao longo da graduação.

A todos os colegas de trabalho do Departamento de Ciência do Solo, em especial Arnon, Amanda, Edinei, Barbara e Jefferson, pelas contribuições no meu aprendizado.

À Universidade Federal de Lavras pelo ensino de excelência, ética e por proporcionar toda a estrutura e suporte para a realização da pesquisa.

Ao Programa de Iniciação Científica da UFLA (PIBIC/UFLA) pela concessão da bolsa durante o desenvolvimento deste projeto. Às instituições FAPEMIG, CAPES e CNPq, pelo apoio financeiro.

E a todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para a realização desse trabalho e me ajudaram a me tornar uma pessoa melhor.

## RESUMO

O fornecimento de alimentos com equilíbrio nutricional, tem se tornado cada vez mais um desafio, principalmente diante do crescente aumento populacional e a produção agrícola mundial. Estratégias têm sido utilizadas para suprir essa demanda nutricional, dentre elas, destaca-se a biofortificação agronômica, a qual consiste em aumentar a concentração de elementos essenciais para os seres humanos e animais, com o fornecimento desses elementos às plantas através da adubação, as quais irão gerar alimentos. O selênio não é um nutriente de plantas, contudo, estudos já mostraram inúmeros efeitos benéficos quando é fornecido. O selênio possui características químicas semelhantes ao enxofre, que é um elemento essencial as plantas, gerando competição pelos mesmos sítios de absorção pelas plantas. O presente trabalho teve como objetivo avaliar a produção da soja (*Glycine max*) em função de doses de enxofre (S) e selênio (Se). O experimento foi conduzido em casa de vegetação utilizando vasos de 5 dm<sup>3</sup> em delineamento de blocos casualizados em esquema fatorial 3 × 5, com três doses de S (0, 45 e 90 mg dm<sup>-3</sup>), cinco doses de Se (0,0; 0,5; 1,0; 2,0 e 4,0 mg dm<sup>-3</sup>), e quatro repetições, totalizando 60 parcelas experimentais. Foi analisado a massa seca de grãos (MSG), massa seca das vagens (MSV), número de vagens por planta (NV) e massa seca da parte aérea (MSPA). Os resultados obtidos demonstraram que a dose de 0,5 mg dm<sup>-3</sup> de Se teve um desempenho significativo nos atributos MSV e MSG, quanto a MSPA e NV não obteve resultados significativos. As doses de S tiveram efeito significativo em todos os atributos, e foi observado que quanto maior a dose, maior foi a produção, exceto no NV, onde a dose de 45 mg dm<sup>-3</sup> apresentou maior produção. Diante dos resultados, podemos concluir que o Se pode proporcionar incremento de produtividade a cultura da soja desde que as doses sejam ajustadas para a cultura, assim como as doses de S.

**Palavras-chave:** Nutrição de plantas, *Glycine max*, Biofortificação.

## SUMÁRIO

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1 INTRODUÇÃO .....</b>                               | <b>8</b>  |
| <b>2 REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>                      | <b>10</b> |
| <b>2.1 Cultura da Soja .....</b>                        | <b>10</b> |
| <b>2.2 Biofortificação .....</b>                        | <b>12</b> |
| <b>2.3 Enxofre .....</b>                                | <b>13</b> |
| <b>2.4 Selênio.....</b>                                 | <b>15</b> |
| <b>3 MATERIAL E MÉTODOS.....</b>                        | <b>17</b> |
| <b>3.1 Local, solo e delineamento experimental.....</b> | <b>17</b> |
| <b>3.2 Correção do solo, adubação e plantio.....</b>    | <b>17</b> |
| <b>3.3 Colheita .....</b>                               | <b>19</b> |
| <b>3.4 Análises estatísticas .....</b>                  | <b>19</b> |
| <b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>                    | <b>19</b> |
| <b>5 CONCLUSÃO.....</b>                                 | <b>22</b> |
| <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>                  | <b>23</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

De acordo com a FAO (2019), estima-se que o crescimento populacional será de 2 bilhões de pessoas nos próximos 30 anos, fazendo-se necessário que a quantidade de alimentos produzidos seja duplicada para suprir a demanda mundial.

Em 2018, cerca de 820 milhões de pessoas em todo o mundo não tiveram acesso suficiente a alimentos para levarem uma vida saudável e ativa. Diante das projeções de crescimento populacional, do aumento do consumo per capita, da expansão das cidades e das restrições no uso de terra nas próximas décadas, fazem mais presente o debate sobre a incapacidade de atender às necessidades humanas por alimentos (SAATH e FACHINELLO, 2018).

Uma das grandes preocupações da atualidade refere-se não somente a quantidade de alimentos produzidos, mas à qualidade nutricional destes, já que, nem sempre os elementos que compõem estes alimentos como o cálcio (Ca), fósforo (P), ferro (Fe), selênio (Se), zinco (Zn), entre outros, estão em quantidades suficientes e disponíveis para o suprimento da necessidade mínima para o organismo humano. Diante disso, uma das técnicas que tem ganhado destaque em estudos de nutrição de plantas é a biofortificação agrônômica, pois associa a nutrição vegetal à possibilidade de disponibilizar elementos essenciais para os seres humanos que consomem tais produtos biofortificados.

O Se é essencial para animais e humanos, participando da constituição de proteínas que atuam no metabolismo do hormônio tireoidiano, função antioxidante, além de auxiliar na prevenção de doenças (RAMOS et al., 2011; DUNTAS e BENVENGA, 2015). No entanto, estima-se que 15% da população mundial apresentem deficiência em Se devido ao consumo de alimentos com baixa concentração desse elemento, e este fato pode ser atribuído ao seu baixo teor nos solos (HAWRYLAKNOWAK, 2013), o que reflete na planta e no ser humano.

As plantas representam a principal fonte para a entrada de Se na cadeia alimentar, a biofortificação constitui uma das principais estratégias para aumentar a sua concentração nos alimentos, contribuindo para superar a questão da deficiência de Se na dieta humana (MALAGOLI et al., 2015; WU et al., 2015).

Na literatura a partir das pesquisas com biofortificação de Se em culturas de interesse econômico e de amplo consumo, observaram-se que o comportamento do elemento na planta está relacionado diretamente com a concentração de enxofre (S). A interação entre o Se e S ocorre devido às propriedades químicas e bioquímicas



semelhantes que possuem, resultando em interações significativas entre os dois elementos nos processos de absorção pelas plantas (HUANG et al., 2008).

Cartes et al. (2006), estudando a interação Se e S em azevém (*Lolium perenne*), relataram que a concentração de Se na parte aérea diminuiu com o aumento da aplicação S, e ainda que ao aplicar S nas doses de 50 ou 100 mg kg<sup>-1</sup> diminuiu a concentração de Se em mais de 33% em relação ao tratamento sem adição de S. Em relação a produção de matéria seca, segundo os autores, não foi significativamente alterada pela fertilização com S ou pelo conteúdo de Se na parte aérea.

Estudando a interação Se e S em morango (*Fragaria x ananassa* Duch.), Santiago et al. (2018) demonstraram que a concentração e o acúmulo de Se foram reduzidos na parte aérea e nos frutos de morango com a aplicação da adubação sulfatada, enquanto a absorção de S foi maximizada com o aumento dos teores de Se. Segundo os autores, o morango apresenta boa capacidade de enriquecimento nutricional com Se, o que foi demonstrado pelo acúmulo de Se nos frutos, bem como pela maior produtividade de frutos.

A soja (*Glycine max* (L.) é uma das culturas de maior destaque no agronegócio brasileiro e mundial. Atualmente, o Brasil é o segundo maior produtor mundial do grão, com produção de 124,048 milhões de toneladas na safra 2021/22, segundo levantamento da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2021). A soja é considerada uma das fontes alimentares mais nutritivas de proteína, óleo e alguns componentes funcionais, que possuem propriedades terapêuticos em muitas doenças humanas, incluindo o câncer e distúrbios neurológicos, autoimunes e cardiovasculares (DIXIT et al., 2010; CHUNG et al., 2011; BERDOWSKA et al., 2013; DZIAŁO et al., 2016).

Diante do exposto, e em virtude da importância econômica e nutricional da soja no contexto global, objetivou-se nesse estudo avaliar a interação entre o enxofre (S) e o selênio (Se) na produção de plantas de soja.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Cultura da Soja

A soja é uma planta que pertence à Família *Fabaceae* (Leguminosae), subfamília *Faboideae*, sendo que a forma cultivada apresenta o nome científico de *Glycine max* (L.) Merrill (Costa, 1996). Essa cultura está entre as principais oleaginosas cultivadas, é fonte de proteínas e lipídios (Smith; Circle, 1978) e usada na alimentação tanto de humanos quanto de animais. Esse alimento fornece também vitaminas, minerais e fitoquímicos, como as isoflavonas, que atuam prevenindo doenças crônicas degenerativas (JACKSON et al., 2002; MURPHY et al., 2002).

O país é atualmente o principal produtor de soja, ultrapassando os Estados Unidos em 2020 se tornou o maior produtor mundial de soja. Entre os anos de 2019 e 2020, foram produzidas 124 milhões de toneladas de soja. O Brasil ainda pode aumentar sua produção, expandindo as áreas com lavoura de soja e impulsionado o crescimento da produção, diferentemente dos Estados Unidos que já usam praticamente o máximo de terra que possuem para cultivar soja (SIMPSON, 2020).

Grandes produtores de soja destinam a maior parte da produção para a alimentação de animais. Nos Estados Unidos, mais de 70% da soja colhida é transformada em ração animal, e somente 15% é para consumo humano. Uma pequena porcentagem, cerca de 5% é usado como biodiesel e o restante é exportado (Simpson, 2020). O cenário agrícola mundial, a partir do ano de 2000, propiciou as condições para o aumento do cultivo da soja, em razão da crescente demanda na alimentação dos animais para a produção de carne (HIRAKURI, 2020).

Seguindo essa tendência, no Brasil, a maior parte da produção é exportada e utilizada também na alimentação dos animais, para a produção de carne, principalmente de suínos e aves. Da produção brasileira, cerca de 63% do farelo, 44% do óleo e 38% do grão é destinado para exportação ao mercado externo. No período de 1990 a 2005, o crescimento das exportações foi de 14,82% para grãos de soja, para o óleo o aumento foi de 8,60 e para o farelo, de 3,16%. Dessa forma, nos últimos anos, a comercialização de produtos obtidos a partir da soja produzida no Brasil tem aumentado significativamente (DALL'AGNOL et al., 2006).

Entre os principais produtos extraídos da soja estão o óleo bruto, o óleo refinado e o farelo de soja, que é um resíduo da produção de óleo. A obtenção desses produtos segue as etapas de armazenamento, preparação dos grãos, seguida pelo processo de extração do óleo. Os cuidados no armazenamento afetam diretamente o rendimento e a qualidade dos produtos finais obtidos no processamento, assim como a preparação e a extração do óleo com solvente químico (MANDARINO; ROESSING, 2001).

A partir da soja também são feitos diversos alimentos que fornecem quantidade substancial de proteína, sendo possível a substituição da carne, em função da quantidade de proteína necessária ao adequado funcionamento do organismo humano (Wilcox, 1985). Por isso muitas vezes são opção de alimentação para vegetarianos e veganos, sendo considerados produtos saudáveis, atuando na prevenção de doenças (FRIEDMAN e BRANDON, 2001).

As características químicas e nutricionais da soja, a qualificam como funcional, fornecendo além de proteína de qualidade, propriedades preventivas e até mesmo terapêuticas para o tratamento de doenças como câncer e osteoporose, atenuando os sintomas da menopausa e prevenindo problemas cardiovasculares (HASLER, 1998).

A soja é fonte de minerais como ferro, potássio, zinco, magnésio, cobre, fósforo, manganês e vitaminas do complexo B. A composição nutricional da soja inclui ácidos graxos poliinsaturados, que favorecem a redução de riscos de doenças degenerativas e crônicas, além de peptídeos, oligossacarídeos, fitosteróis, fitatos, isoflavonas e principalmente proteínas (CARRÃO-PANIZZI e MANDARINO, 1998).

O teor de proteína da soja pode variar devido a fatores genéticos e alterações na disponibilidade do nitrogênio para os grãos. Essas diferenças que ocorrem no ambiente são reguladas principalmente pelos processos de fixação biológica do nitrogênio (HAYATI, EGLI e CRAFTSBRANDNER 1995). (PÍPOLO, 2002).

As raízes da soja são infectadas pela bactéria *Bradyrhizobium japonicum*, a qual cresce, desenvolvendo estruturas chamadas nódulos. A maior parte do nitrogênio de que a planta necessita é fornecido por essas bactérias que se encontram nos nódulos. Esse processo natural é conhecido como fixação de nitrogênio, onde ocorre a transformação do nitrogênio gasoso, que se encontra no solo e é indisponível à planta, em produtos nitrogenados que se tornam disponíveis. Nessa relação simbiótica, a planta oferece em troca, o suprimento de carboidratos para as bactérias (POTAFOS, 1997).

## 2.2 Biofortificação

A biofortificação no cenário mundial atual, se junta ao combate à desnutrição em países em desenvolvimento, bem como a fortificação de micronutrientes para benefícios para populações específicas, como crianças, lactantes, gestantes e idosos, desta forma, a biofortificação de alimentos tem se mostrado uma eficiente alternativa no combate a deficiências nutricionais.

Alimentos biofortificados podem ser obtidos por meio de melhoramento convencional de plantas da mesma espécie que após selecionadas são cruzadas para a obtenção de variedades com maiores teores de ferro, zinco e pró-vitamina A (NUTTI, M. R, 2010). Segundo WELCH et al., (2008), biofortificação baseia-se no melhoramento de plantas no uso das variações genótípicas, intra e interespecíficas, com o objetivo de obter produtos agrícolas alimentares com maiores teores de nutrientes e vitaminas.

O processo de biofortificação pode ocorrer também através da adubação mineral, denominada como biofortificação agrônômica, por meio de utilização de fertilizantes. Processo tal, geralmente empregado em culturas de cereais e vegetais de alto consumo, que pode garantir que uma elevada parcela da população tenha acesso a este produto biofortificado. Sendo assim, esta pode ser considerada uma técnica sustentável, de baixo custo e alta eficiência. (NASCIMENTO, 2018).

Segundo MORAES et al., (2009), O Brasil apresenta fortes evidências de deficiência de Se na população, no entanto, nenhuma pesquisa completa sobre o assunto está disponível. FERREIRA et al. (2002) relataram que alimentos consumidos no Brasil possuem consideravelmente baixo teor de Se, quando comparados a padrões internacionais, como por exemplo nos Estados Unidos, o que é talvez, um dos fatores determinantes do baixo teor de Se nos solos brasileiros.

Os teores de Se nos produtos agrícolas alimentares, são fortemente dependentes da presença deste no solo, mas também da regulação em função espécie/genótipo vegetal. Na atualidade a adição de Se em área agrícolas juntamente com fertilizantes NPK se demonstra ser a forma mais efetiva e também segura para contornar a questão da deficiência deste micronutriente na alimentação humana e animal. (REIS, et al. 2014)

### 2.3 Enxofre

O enxofre é um dos elementos considerados essenciais para todas as plantas, angiospermas e gimnospermas, sendo assim insubstituível e fundamental para que a planta complete seu ciclo de vida. Além de essencial, o enxofre pode ser classificado como um macronutriente exigido na quantidade da ordem de  $10^3$  mg  $\text{kg}^{-1}$  de matéria seca e componente de biomoléculas. Com base na sua mobilidade dentro da planta o enxofre é classificado como um elemento pouco móvel (FAGAN et al., 2016).

Segundo a classificação dos nutrientes minerais das plantas de acordo com a sua função bioquímica, o enxofre faz parte dos nutrientes de compostos de carbono, assim como o nitrogênio. As plantas assimilam esses nutrientes por meio de reações bioquímicas que envolvem redução e oxidação, formando assim ligações com carbono e formando compostos orgânicos como aminoácidos, proteínas e ácidos nucleicos. O enxofre é constituinte da coenzima A, tiamina pirofosfato, glutatona, biotina e de ácido lipóico, além de ser componente de cistina, metionina e cisteína (TAIZ et al., 2017).

O enxofre é absorvido pelas plantas através das células radiculares por meio de proteínas transportadoras denominadas simporte. Ocorre o transporte via simplasto, das células da endoderme para o estelo radicular, sendo posteriormente movido para as células parenquimáticas do xilema, e em seguida para os elementos condutores até atingir a corrente transpiratória (LEWANDOWSKA; SIRKO, 2008).

Quando não há um suprimento adequado de um elemento essencial, pode ocorrer um distúrbio nutricional manifestado por sintomas de deficiência característicos nas plantas (Oliveira et al., 2006). O enxofre é absorvido principalmente na forma  $\text{SO}_4^{2-}$ , sendo em sua maior parte translocado das raízes para a parte aérea. Por isso os sintomas de deficiência de enxofre podem ser visualizados nas folhas que usualmente apresentam, nesses casos, clorose da superfície foliar devido à deficiência de clorofila. Na maioria das espécies, o enxofre não é redistribuído de forma facilitada a partir dos tecidos maduros. Dessa forma, os sintomas são comumente observados em folhas jovens. Porém, a clorose pode se manifestar em certas espécies, tanto em folhas jovens quanto nas mais velhas (KERBAUY, 2019).

Em busca da otimização da produção, é importante observar e analisar não somente os níveis de nutrientes no solo, assim como no tecido vegetal, buscando uma fertilização mais adequada e direcionada. Na nutrição mineral de plantas, as necessidades

de elementos minerais variam de acordo com a cultura e ao longo do crescimento e desenvolvimento da planta. Os nutrientes podem influenciar diretamente na produtividade das plantas cultivadas, em órgãos de crescimento e armazenamento que são economicamente importantes, como grãos, tubérculos e frutos (OLIVEIRA et al., 2006).

A produção de enxofre no Brasil é baixa, considerando suas condições geológicas, refletindo assim, na escassez deste insumo. Nesse contexto, a maior parte dos compostos químicos que contém enxofre são advindo de outros países, o que torna o Brasil dependente de importações. É estimado que o país apresenta uma dependência externa de 50% do fósforo, 70% do nitrogênio e de 90% do potássio, gerando assim um grande ônus à balança comercial. Como uma alternativa, fonte de cálcio, magnésio e enxofre, estão o calcário agrícola, a magnesita e a gipsita, os quais estão disponíveis no país (ALBUQUERQUE et al., 2008).

Os solos geralmente apresentam enxofre em excesso, ao contrário da disponibilidade de nitrogênio, a qual limita a produtividade das plantas em muitos ecossistemas. Contudo, o nitrogênio e o enxofre são semelhantes quimicamente devido à ampla variação de oxidação e redução. Nessas reações, formas inorgânicas altamente oxidadas, como o nitrato e o sulfato, são convertidas em compostos orgânicos altamente reduzidos como os aminoácidos (TAIZ et al., 2017).

A entrada do enxofre no solo pode acontecer por meio do intemperismo de minerais sulfatados, irrigação, águas de chuvas, resíduos de vegetais e de animais, deposição atmosférica de poeira e adições de pesticidas e fertilizantes, minerais ou orgânicos. A lixiviação, a erosão, as queimadas e as emissões de gases sulfurados estão entre as principais formas de saída do enxofre, com a exportação do nutriente pelas culturas. Em áreas próximas de regiões urbanas ou industriais a incorporação de formas gasosas de enxofre ao solo tem grande importância, a qual ocorre pela dissolução da água vinda das chuvas e pela deposição de poeira (ALVAREZ et al., 2007).

No Brasil, principalmente em solos da região do Cerrado, pode ser observada deficiência de enxofre, devido à baixa fertilidade do solo juntamente com o baixo teor de matéria orgânica e a exportação de enxofre pelas culturas, como ocorre nos grãos de soja, por exemplo. Esses fatores associados à lixiviação de sulfato, a qual é acentuada pela aplicação de fósforo e calcário e as produtividades elevadas dos cultivos, propiciam ainda mais a deficiência de enxofre (VITTI et al., 2007; RHEINHEIMER et al., 2005).

De acordo com a espécie cultivada e a produtividade esperada, as exigências de nutrientes como o enxofre variam. Entre as culturas de média e alta exigência estão as leguminosas, as quais são mais exigentes em razão de seu alto teor de proteínas (ALVAREZ et al., 2007). Entre essas culturas podemos destacar a soja, que é um cultivo exigente desse nutriente e responde à adubação com enxofre, principalmente em áreas de cerrado (BROCH et al., 2011), onde as áreas de produção e a produtividade da cultura tem grande importância para o setor agrícola brasileiro.

Entre as fontes de enxofre utilizadas para suprir as deficiências pode-se citar os fertilizantes sulfatados simples ou compostos, os quais possuem teores variáveis de enxofre. Os fertilizantes sulfatados simples mais comumente utilizados são sulfato de amônio, superfosfato simples, sulfato de potássio, gesso e fertilizantes nitrogenados como ureia e nitrato de amônio contendo sulfato. Em fertilizantes compostos, como o NPK, o teor de enxofre varia de 1 a 10% (STIPP; CASARIN, 2010). Uma alternativa é o uso do enxofre na forma elementar, o que requer que o produto utilizado tenha partículas finas que aumentam a eficiência de ação dos microrganismos no solo (HOROWITZ, 2003).

Vitti et al. (2007) mostraram, ao estudar a assimilação foliar de enxofre elementar pela soja, que o enxofre elementar aplicado nas folhas é assimilado pela planta de soja, independente da dose e da fonte que esse nutriente se originou na natureza. Além disso, a aplicação de enxofre elementar via foliar, apresenta eficiência superior se comparada às aplicações realizadas no solo.

## **2.4 Selênio**

O selênio é um micronutriente para muitos organismos e um elemento de grande importância fisiológica e ecotoxicológica (Chatterjee et al., 2001; Seixas; Kehrig, 2007). Pode ser encontrado em concentrações traço, sendo necessário no crescimento e desenvolvimento de organismos, já em concentrações moderadas é capaz de manter funções homeostáticas e em concentrações elevadas pode ser tóxico. O limite entre sua essencialidade e uma dosagem tóxica é muito pequeno, por isso muitas vezes o selênio é considerado um elemento tóxico (Chapman, 1999).

A disponibilidade, assim como a toxicidade do selênio dependem, principalmente, da forma química que esse elemento se apresenta. A liberação e a utilização desse micronutriente, devido ao aumento das atividades antropogênicas realizadas atualmente,

que alteram todo o ambiente, têm aumentado a disponibilização das fontes naturais como por exemplo, rochas e solo. Essa liberação pode tornar o nutriente disponível ao homem e outros organismos principalmente através da alimentação (Seixas; Kehrig, 2007).

O selênio pode ser incorporado ao meio ambiente através de fontes naturais, intermediadas por processos biológicos, ou então introduzido pelo homem, na indústria e na agricultura (Seixas; Kehrig, 2007). O elemento se encontra em toda a crosta terrestre, no solo, em sedimentos, no oceano e afluentes. Dessa forma, o selênio pode ser encontrado nos ecossistemas terrestre e aquático. Do ambiente marinho, é transferido para a atmosfera, onde por meio de deposição seca e úmida chega à superfície terrestre (Eisler, 1985).

O elemento selênio é essencial para a saúde do homem e dos animais, sendo incorporado aos aminoácidos, onde atua como um co-fator nas enzimas antioxidantes, propiciando a manutenção do sistema imunológico, a regulação da tireoide, manutenção da função cognitiva do cérebro, capacidade antioxidante e antiviral e prevenção de câncer (Ullah et al., 2019). A deficiência de selênio no corpo humano pode, portanto, acarretar complicações médicas, como a catarata e doenças cardiovasculares, comprometendo o sistema imunológico (Newman et al., 2019).

Aproximadamente 15% da população mundial sofre com a deficiência de selênio (Dinh et al., 2018), a qual pode ser suprida por meio da alimentação, pois as plantas são a principal fonte de selênio para os humanos. Contudo, os níveis de selênio em alimentos básicos como o arroz e o trigo, geralmente são muito baixos. Nesse contexto, uma alternativa viável, é a biofortificação dos alimentos por meio do enriquecimento com o selênio (Zhou et al., 2020).

A concentração do selênio nos alimentos e no solo é regulada por diversos fatores. A quantidade de chuva determina o conteúdo de selênio no solo, além das condições climáticas e a cobertura vegetal. Quando em regiões que recebem menos de 500 mm de chuva, o solo pode conter selênio potencialmente tóxico derivado de rochas com alto teor de selênio. Já em locais mais úmidos, mesmo em solos que comumente apresentam altos teores de selênio, esse elemento se liga ao ferro, formando assim um complexo pouco solúvel (Kaur et al., 2014).

O selênio disponível no solo é absorvido, assimilado e acumulado pelas plantas, tornando-se disponível aos humanos na alimentação. O processo de absorção de selênio nas plantas é permeado por muitos mecanismos, variando de acordo com a espécie.



Alguns fatores que podem afetar esse processo de absorção são o pH, a salinidade, o conteúdo de  $\text{CaCO}_3$ , íons sulfato e fosfato (Wu, 2004).

As plantas absorvem pelas células radiculares o selênio da solução do solo, principalmente na forma de selenato e em menor quantidade na forma de selenito (White et al., 2004). A absorção e a translocação do selenato nas plantas se dá mais rapidamente do que a absorção de selenito. Além disso, mais de 50% do selênio é transferido das raízes para a parte aérea das plantas em cerca de três horas se fornecido na forma de selenato. Enquanto na forma de selenito, somente 10% é transportado nessas mesmas condições (Cartes et al., 2005).

### **3 MATERIAL E MÉTODOS**

#### **3.1 Local, solo e delineamento experimental**

O experimento foi realizado em vasos, em casa de vegetação do Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras, cultivados em Latossolo Vermelho Amarelo Distroférico típico de textura média (EMBRAPA, 2013) coletado em campo não cultivado sob vegetação natural, situado no município de Lavras - MG. Foram realizadas análises físicas, químicas e mineralógicas das amostras para caracterização do solo utilizado (EMBRAPA, 1997; SILVA, 2009).

O experimento foi instalado em delineamento em blocos casualizados em esquema fatorial (3 x 5), com três doses de S e cinco doses de Se, quatro repetições por tratamento, totalizando 60 parcelas experimentais. A unidade experimental foi formada por um vaso contendo 5 dm<sup>3</sup> de solo e duas plantas.

#### **3.2 Correção do solo, adubação e plantio**

Com base na análise química, foi realizado a correção do solo utilizando o método de saturação por bases, utilizando calcário dolomítico (proporção estequiométrica de 3:1 entre Ca e Mg, respectivamente, e com poder reativo de neutralização de 80%) e incorporando-o no solo de cada vaso, elevando a saturação por bases a 70%. O solo

permaneceu incubado por 30 dias, com umidade próxima a 60% do volume total de poros (VTP) para propiciar a reação do calcário.

A adubação básica de plantio com macro e micronutrientes foi realizada na forma de solução nutritiva (MALAVOLTA, 1980; NOVAIS et al. 1991) em cada vaso. No plantio foram semeadas seis sementes de soja por vaso. Foi realizada a inoculação da semente com bactérias do gênero *Bradyrhizobium* para garantir a nutrição nitrogenada do experimento por meio da fixação biológica de nitrogênio. Após a germinação e apresentarem seu primeiro par de folhas verdadeiras, foi realizado o desbaste, afim de deixar apenas duas plantas por vaso.

As doses de S foram estabelecidas em conformidades a análise química de solo, nos valores de 0, 45 e 90 mg dm<sup>-3</sup> e aplicadas juntamente com a adubação básica de plantio. A fonte de S para o experimento utilizada foi o sulfato de potássio. O Se foi aplicado nos vasos em cobertura na forma de solução, 10 dias após a germinação das sementes, nas doses de 0; 0,5; 1,0; 2,0 e 4,0 mg dm<sup>-3</sup> utilizando como fonte o selenato de sódio (tabela 1).

Tabela 1. Fonte de Se e balanceamento das suas respectivas doses de acordo com sua massa molar.

| Selenato de sódio (Na <sub>2</sub> SeO <sub>4</sub> ); MM = 18894 |   |   |  |
|---|---|---|--|
| Se (mg dm <sup>-3</sup> )   | Na <sub>2</sub> SeO <sub>4</sub> (mg dm <sup>-3</sup> ) | Na <sub>2</sub> SeO <sub>4</sub> (mg vaso <sup>-1</sup> ) | Na <sub>2</sub> SeO <sub>4</sub> (g/0,5 L) |
| 0,0   | 0,000   | 0,000   | 0,000                                      |
| 0,5   | 1,196   | 5,982   | 0,300                                      |
| 1,0   | 2,393   | 11,964  | 0,598                                      |
| 2,0   | 4,786   | 23,929  | 1,196                                      |
| 4,0   | 9,571   | 47,857  | 2,392                                      |

Tabela 2. Fonte de S e balanceamento das suas respectivas doses de acordo com sua massa molar.

| Sulfato de potássio (K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ); mm =174259 |  |  |   |
|---|--|--|---|
| S (mg/dm <sup>3</sup> )   | K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (mg/dm <sup>3</sup> ) | K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (mg/vaso) | K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (g/10 L) |
| 0   | 0000   | 0000                                     | 0000                                    |
| 45  | 244555   | 1222775                                  | 61139                                   |
| 90  | 489110   | 2445550                                  | 122277                                  |

### **3.3 Colheita**

A colheita do experimento ocorreu de acordo com o ciclo fenológico da cultura, e as plantas foram separadas em parte aérea e grãos. A parte aérea e os grãos foram secos em estufa a 65 °C, e posteriormente foi aferido a massa seca.

### **3.4 Análises estatísticas**

Os dados foram submetidos à análise de variância pelo teste F ( $p \leq 0,05$ ). As interações entre os fatores foram avaliadas e as médias comparadas por meio do teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ) ou análises de regressão polinomial ( $p \leq 0,05$ ). Todas as análises foram realizadas no software R (R Core Team, 2020).

## **4 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Os parâmetros de crescimento avaliados não foram influenciados pela interação S e Se ( $p > 0,05$ ). Contudo, ocorreu influência das doses de S e Se quando avaliadas isoladamente.

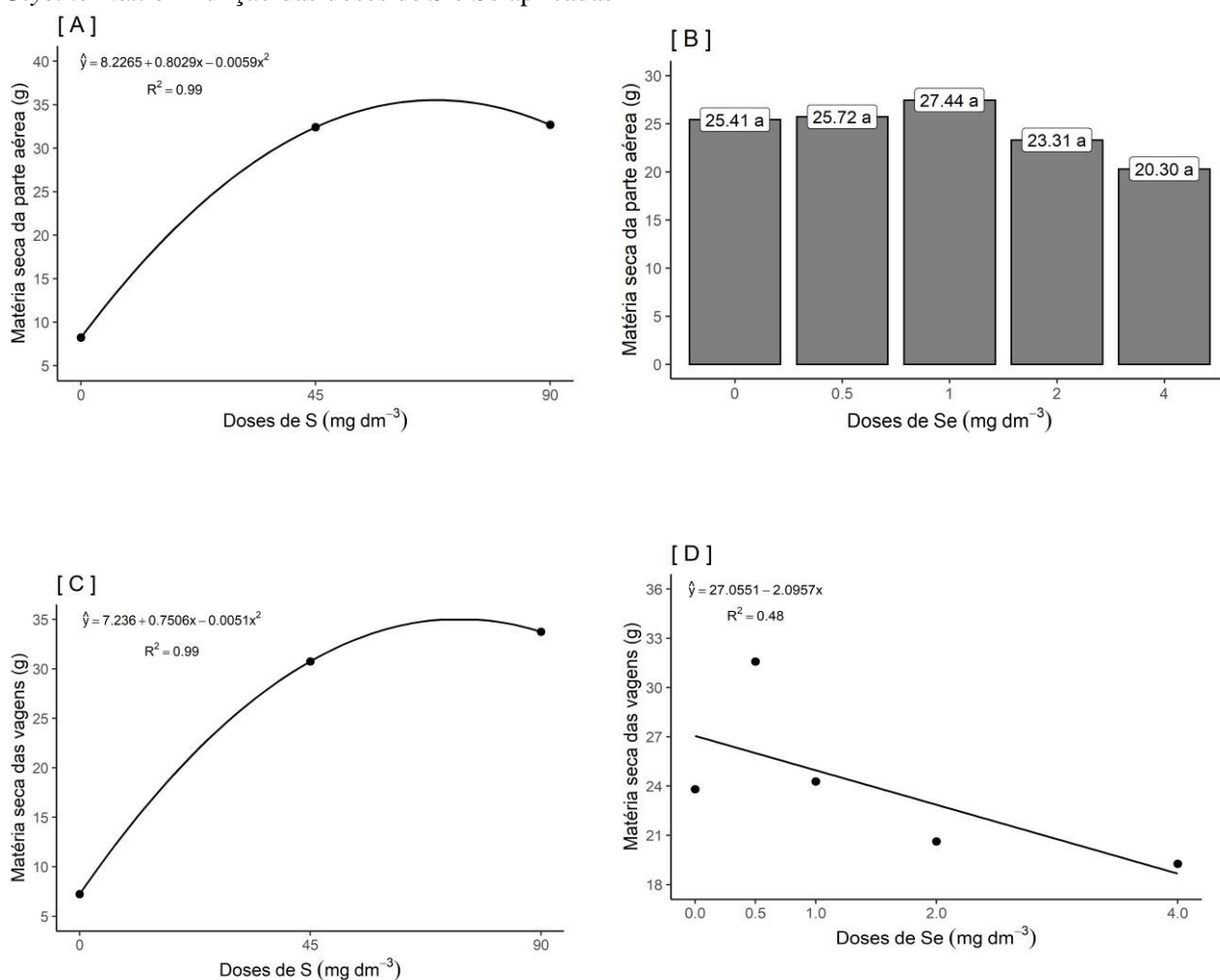
As doses crescentes de S proporcionaram incremento na produção MSPA, MSV e MSG sendo as maiores produções nas doses de 68,04 (35,54g), 73,59 (34,85g) e 79,11(18,86g) mg dm<sup>-3</sup> de S, respectivamente. Entretanto no NV houve uma redução de 3,39% na dose de 90 mg dm<sup>-3</sup>, quando comparada a dose de 45 mg dm<sup>-3</sup> (FIGURA 1A, 1C, 2E, 2G).

Coelho (2018) ao avaliar diferentes fontes e doses de S em experimento a campo observou valores inferiores relacionados ao número de vagens, sendo encontradas 41,6 vagens por planta na dose de 25 kg ha<sup>-1</sup>.

O S é considerado um elemento essencial ao desenvolvimento das plantas, participando da síntese proteica através dos aminoácidos cistina e metionina por exemplo. Na ausência desse elemento, há limitações com relação ao crescimento das plantas (TAIZ et al., 2017; ALVAREZ, et al., 2007). No presente estudo, foi possível observar os efeitos

diretos nos parâmetros avaliados, com relação a adubação sulfatada, demonstrando a suma importância desse elemento para a cultura e para o alcance de altas produtividades.

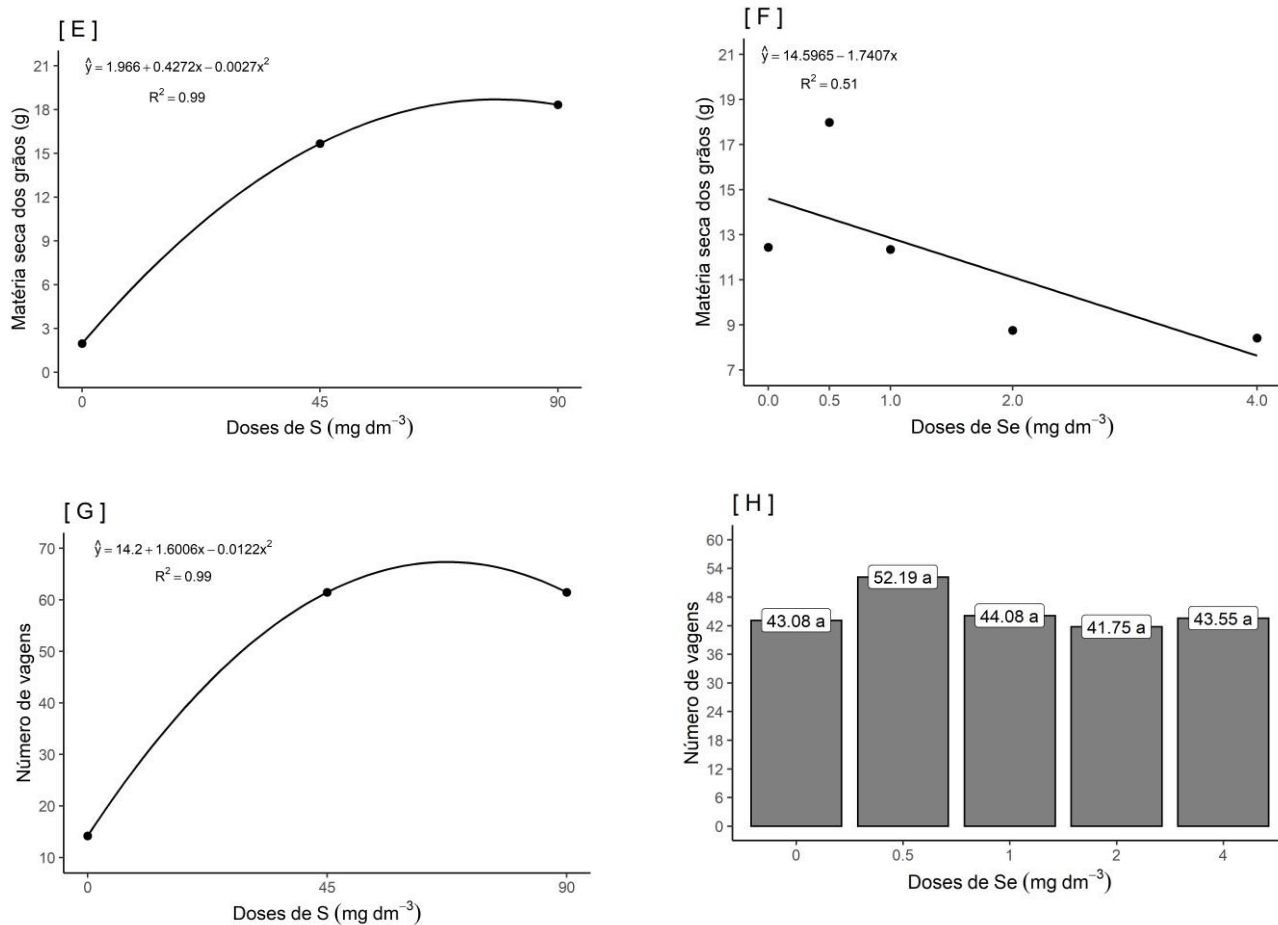
Figura 1: Matéria seca da parte aérea (A e B); matéria seca das vagens (C e D); em plantas de *Glycine max* em função das doses de S e Se aplicadas



Com relação as doses de Se aplicadas, não houve diferença significativa nos parâmetros de MSPA e NV, sendo os maiores valores nas doses de 1,0 (27, 44g) e 0,5 (52,19 vagens)  $\text{mg dm}^{-3}$ , respectivamente (FIGURA 1B, 2H).

A dose de 0,5  $\text{mg dm}^{-3}$  proporcionou maior MSV e MSG, respectivamente, contudo a partir da dose de 1,0  $\text{mg dm}^{-3}$  houve um decréscimo com relação aos parâmetros avaliados (MSV e MSG), sendo o menor valor encontrado na dose de 2,0  $\text{mg dm}^{-3}$ , induzindo a partir dessa dose o efeito tóxico desse elemento às plantas (FIGURA 1D, 2F).

Figura 2: Matéria seca dos grãos (E e F) e número de vagens (G e H) em plantas de *Glycine max* em função das doses de S e Se aplicadas.



O sulfato e o selenato são similares quimicamente, competindo pelos mesmos sítios de absorção e assimilação pelas plantas, contudo quando presentes no solo, o S não favorece a absorção de Se, podendo ocorrer uma inibição competitiva entre esses elementos, influenciando no desenvolvimento das plantas e consequentemente na biofortificação com Se, sendo imprescindível o equilíbrio com relação ao manejo da adubação com S e Se.

## **5 CONCLUSÃO**

A cultura da soja se desenvolveu adequadamente ao longo do ciclo, sendo doses crescentes de S e a dose de  $0,5 \text{ mg dm}^{-3}$  benéficas a sua produção, principalmente com relação a produção de grãos, além disso a cultura demonstrou ser favorável a biofortificação agronômica com Se, não apresentando sintomas de toxidez.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBUQUERQUE, G. A. S. C.; AZAMBUJA, R. S. L.; LINS, F. A.F. Agrominerais – enxofre. In: **Rochas e Minerais Industriais no Brasil: usos e especificações**. 2 ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, P. 125-139, 2008.

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

BERDOWSKA, I. ZIELIŃSKI, B.; FECKA, I.; KULBACKA, J.; SACZKO, J.; GAMIAN, A. Cytotoxic impact of phenolics from Lamiaceae species on human breast cancer cells. **Food Chem**, v.141, n.2, p.1313–21, 2013.

BROCH, D. L. et al. Produtividade da soja no cerrado influenciada pelas fontes de enxofre. **Revista Ciência Agronômica**, v. 42, n. 3, p. 791-796, 2011.

CARTES, P.; SHENE, C.; MORA, M.L. Selenium distribution in ryegrass and its antioxidant role as affected by sulfur fertilization. **Plant Soil**, v.285, p.187-95, 2006.

CHUNG, I.M.; SEO, S.H.; AHN, J.K.; KIM, S.H. Effect of processing, fermentation, and aging treatment to content and profile of phenolic compounds in soybean seed, soy curd and soy paste. **Food Chem**, v.127, n.3, p. 960–7, 2011.

CONAB, **Acompanhamento da Safra - Grãos**, v.11 - Safra 2021/22 – Agosto, 2022. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>. Acesso em: 22 ago. 2022.

DIXIT, A.K.; BHATNAGAR, D.; KUMAR, V.; RANI, A.; MANJAYA, J.G.; BHATNAGAR, D. Gamma irradiation induced enhancement in isoflavones, total phenol, anthocyanin and antioxidant properties of varying seed coat colored soybean. **J Agric Food Chem**, v.58, n.7, p.4298–302, 2010.

DUNTAS, L.H.; BENVENGA, S. Selenium: an element for life. **Endocrine**, v.48, p.756-75, 2015.

DZIAŁO, M.; MIERZIAK, J.; KORZUN, U.; PREISNER, M.; SZOPA, J.; KULMA,

A. The potential of plant phenolics in prevention and therapy of skin disorders. **Int J Mol Sci**, v.17, n.2, p.160, 2016.

EMBRAPA. **Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solo**. Manual de métodos de análise de solo. Rio de Janeiro, Ministério da Agricultura, p.212, 1997.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solo**. Brasília: EMBRAPA. 3ª edição revista e atualizada. p.353, 2013.

FAO, FIDA, OMS, PMA y UNICEF. 2019. El estado de la seguridad alimentaria y la nutrición en el mundo 2019. Protegerse frente a la desaceleración y el debilitamiento de la economía. Roma, FAO.

FAGAN, E. B.; ONO, E. O.; RODRIGUES, J. D.; SOARES, L. H.; NETO, D. D. **FISIOLOGIA VEGETAL: METABOLISMO E NUTRIÇÃO MINERAL**. São Paulo: Andrei, 2016. 305p.

FERREIRA, K.S.; GOMES, J.C.; BELLATO, C.R.; JORDÃO, C.P. Concentração de selênio em alimentos consumidos no Brasil. **Pan American Journal of Public Health**, v.11, n. 3, p.172- 177, 2002.

HAWRYLAK-NOWAK, B. Comparative effects of selenite and selenate on growth and selenium accumulation in lettuce plants under hydroponic conditions. **Plant Growth Regulation**, v.70, p.149-57, 2013.

HOROWITZ, N. **Oxidação e eficiência agrônômica do S elementar em solos do Brasil**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 109 p., 2003.

HUANG, Y.Z.; HUM, Y.; LIU, Y.X. Interactions between sulfur and selenium uptake by corn in solution culture. **Journal of Plant Nutrition**, v.31, n.1, p.43-54, 2008.

KERBAUY, G.B. **Fisiologia vegetal**. 3 ed. Guanabara Koogan: Rio de Janeiro, 2019.

LEWANDOWSKA, M.; SIRKO, A. Recent advances in understanding plant response to sulfur-deficiency stress. **Acta biochimica Polonica**. v. 55, p. 457-71, 2008.

MALAGOLI, M.; SCHIAVON, M.; DALL'ACQUA, S.; PILON-SMITS, E.A.H.



Effects of selenium biofortification on crop nutritional quality. **Front Plant Sci**, v.6, p.280, 2015.

MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: CERES, p.251,1980.

MALAVOLTA, E.; MORAES, M. F. Fundamentos do nitrogênio e do enxofre na nutrição mineral das plantas cultivadas. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S. R. S.; VITTI, G. C. (Eds.). **Nitrogênio e enxofre na agricultura brasileira**. Piracicaba: IPNI, p. 189-249, 2007.

MARTINEZ, R. A. S. **Biofortificação agrônômica de soja com selênio**. Lavras: UFLA, 2013.

MORAES, M.F.; WELCH, R.M.; NUTTI, M.R.; CARVALHO, J.L.V.; WATANABE, E. **Evidences of selenium deficiency in Brazil: from soil to human nutrition**. In: BANUELOS, G.R., LIN, Z.Q., YIN, X.B. (Eds). First International Conference on Selenium in the Environment and Human Health, 2009. Suzhou. Selenium: deficiency, toxicity and biofortification for human health. 116p. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2009. p.73-74.

NASCIMENTO, C.S. **Biofortificação agrônômica da rúcula com selênio em sistema hidropônico**. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2018.

NOVAIS, R.F.; NEVES, J.C.L.; BARROS, N.F. **Ensaio em ambiente controlado**. In: OLIVEIRA, A.J.; GARRIDO, W.E.; ARAÚJO, J.D.; LOURENÇO, L. Métodos de pesquisa em fertilidade do solo. Brasília: EMBRAPA-SEA, p. 189-253, 1991.

NUTTI, M.R. **Biofortificação no Brasil**. In: Seminário Formação de Multiplicadores, 2010, Rio de Janeiro. Biociências como uma ferramenta para a humanidade. Rio de Janeiro: Associação Nacional de Biossegurança, 2010.

RAMOS, S.J., RUTZKE, M.A., HAYES, R.J., FAQUIN, V., GUILHERME, L.R.G. Selenium accumulation in lettuce germplasm. **The Plant Journal**, v.233, p.649-60, 2011. REIS, DOS A.R, JUNIOR, E.F., MORAES, M.F. e MELO, S.P. Biofortificação agrônômica com selênio no brasil como estratégia para aumentar a qualidade dos produtos agrícolas. *Brazilian Journal of Biosystems Engineering* v. 8(2): 128-138, 2014

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, p. 562-569, 2005.

SAATH, K.C.O.; FACHINELLO, A.L. Crescimento da demanda mundial de alimentos e restrições do fator terra no Brasil. **Rev. Econ. Sociol. Rural**, v.56, n.2, Brasília, Apr./June 2018.

SANTIAGO, F.E.M.; SILVA, M.L.S.; RIBEIRO, F.D.; CIPRIANO, P.E.; GUILHERME, L.R.G. Influence of sulfur on selenium absorption in strawberry. **Acta Sci. Agron**, v.40, p.35780, 2018.

SILVA, F.C. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2.ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2009.

STIPP, S. R.; CASARIN, V. A importância do enxofre na agricultura brasileira. **Informações Agronômicas** N°129, IPNI, mar. 2010.

TAIZ, L. et al. **Fisiologia Vegetal**. Porto Alegre: Artmed, 2017.

United States Environmental Protection Agency - US EPA. **Test methods for evaluating solid waste: physical/chemical methods**. 3 ed. Washington, DC: U.S. EPA, 1995. (SW-846, Method 3051).

VITTI, G. et al. Assimilação foliar de enxofre elementar pela soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, n. 02, p. 225-229, 2007.

WELCH, R.M. **Linkages between trace elements in food crops and human health**. In: ALLOWAY, B.J. (Ed.). **Micronutrient deficiencies in global crop production**. New York: Springer, 2008. cap.12, p.287-309.

WU, Z.; BAÑUELOS, G.S.; LIN, Z.Q.; LIU, Y.; YUAN, Y.; YIN, X.; LI, M. Biofortification and phytoremediation of selenium in China. **Front. Plant Sci**, v.6, p.136, 2015.