



ROBERTO ANTONIO SAVELLI MARTINEZ

**BIOFORTIFICAÇÃO AGRONÔMICA DA SOJA
COM SELÊNIO**

LAVRAS –MG

2013

ROBERTO ANTONIO SAVELLI MARTINEZ

BIOFORTIFICAÇÃO AGRONÔMICA DA SOJACOM SELÊNIO

Tese apresentada a Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós- Graduação em Agronomia \ Fitotecnia, área de concentração Produção Vegetal, para a obtenção do título de Doutor.

Orientador

Dr. Pedro Milanez de Rezende

Coorientador

Dr. Adriano Teodoro Bruzi

LAVRAS - MG

2013

**Ficha Catalográfica Elaborada pela Coordenadoria de Produtos e
Serviços da Biblioteca Universitária da UFLA**

Martinez, Roberto Antonio Savelli.

Biofortificação agrônômica da soja com selênio / Roberto Antonio Savelli Martinez. – Lavras: UFLA, 2013.

113 p. : il.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Lavras, 2013.

Orientador: Pedro Milanez de Rezende.

Bibliografia.

1. Soja. 2. Fitotoxidez. 3. Selenato. 4. Selenito. 5. Doses. 6. Formas de aplicação. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 633.34891

ROBERTO ANTONIO SAVELLI MARTINEZ

BIOFORTIFICAÇÃO AGRONÔMICA DA SOJACOM SELÊNIO

Tese apresentada a Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós- Graduação em Agronomia \ Fitotecnia, área de concentração Produção Vegetal, para a obtenção do título de Doutor.

APROVADA em 30 de julho 2013.

Dr. Moises de Sousa Reis	EPAMIG
Dr. Maurício Antônio de Oliveira Coelho	EPAMIG
Dr. Élberis Pereira Botrel	UFLA
Dr. Adriano Teodoro Bruzi	UFLA

Dr. Pedro Milanez de Rezende

Orientador

LAVRAS - MG

2013

A Deus por ter me dado a força necessária para superar os obstáculos da vida e ter-me orientado espiritualmente pelos seus caminhos.

A Roberto Savelli, meu pai (in memoriam), pela educação conselhos e exemplo de vida que me deixou como legado.

A minha mãe e irmã pelo amor e inspiração que me dão todos os dias para continuar lutando por um futuro melhor.

A minha filha Larissa, meu maior amor e tesouro.

A minha família brasileira, Vinícius e Lúcia, meus companheiros, fonte de incentivos, apoio, e força para a superação desta meta.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Universidade Federal de Lavras (UFLA) e ao Departamento de Agricultura (DAG), pela oportunidade concedida para realização do Doutorado.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos.

Aos professores do Departamento de Agricultura da UFLA, pelos ensinamentos transmitidos.

Ao professor Dr. Pedro Milanez de Rezende, pela amizade e pela paciência ao me orientar assim como pelos conhecimentos transmitidos.

Ao professor Dr. Adriano Teodoro Bruzi pela sua Coorientação, conhecimentos transmitidos, amizade e atenção.

Aos amigos do Núcleo de Estudos de Soja e Feijão da UFLA - NESF pela ajuda e colaboração prestada nos processos de condução dos experimentos desse trabalho.

A todos aqueles que de uma maneira ou de outra contribuíram na realização deste trabalho e que de maneira direta ou indireta me apoiaram e fizeram parte da minha vida apesar de não estar aqui citados, o meu infinito agradecimento.

MUITO OBRIGADO!

RESUMO GERAL

Objetivou-se no presente trabalho definir a melhor fonte, dose e forma de aplicação de selênio com o intuito de promover a biofortificação da cultura da soja, bem como avaliar a sua influência nos caracteres agrônômicos. Para isso, quatro experimentos foram realizados. Os dois primeiros foram instalados em DBC em esquema fatorial $2 \times 5 \times 3$ com três repetições: 2 cultivares (BRS Favorita RR e Pioneer P98Y11 RR), 5 doses de selênio (0; 10; 20; 30; 40 g ha^{-1}) na forma de selenato de sódio e 3 formas de aplicação (foliar, solo e semente) em dois locais. As parcelas foram constituídas por 4 linhas de 5 m espaçadas de 50 cm eliminando 0,50 metro nas extremidades, utilizando como área útil as duas fileiras centrais. Avaliou-se: altura de plantas e de inserção do primeiro legume, número de legumes por planta, número de grãos por legume, massa de 100 sementes, acamamento, rendimento de grãos e acúmulo de selênio nos grãos. O terceiro experimento foi conduzido em campo em DBC compreendendo os tratamentos: 7 doses de selênio (0; 10; 20; 40; 60; 120; 200) g ha^{-1} (selenito de sódio) aplicado via foliar com 3 repetições. As parcelas experimentais foram constituídas de 4 linhas com 5 metros de comprimento espaçadas de 50 centímetros utilizando para análise as duas fileiras centrais com a eliminação de 0,50 metro nas extremidades das mesmas. Os caracteres avaliados foram: altura da inserção do primeiro legume, altura da planta, rendimento e acúmulo de selênio nos grãos. E o último experimento foi conduzido em laboratório com o objetivo de avaliar o efeito de doses de Se na germinação de sementes de soja. Utilizou-se o DIC com 4 repetições, em uma estrutura fatorial $2 \times 2 \times 6$: 2 cultivares (BRS Favorita RR e P98Y11 RR), 6 doses de Se (0; 0,05; 0,1; 0,2; 0,3; 0,6 g L^{-1}) e duas fontes (selenato e selenito). As avaliações foram realizadas ao sétimo dia computando-se o número de sementes germinadas. Os experimentos de campo conduzidos com aplicação de selenato de sódio evidenciam que esse elemento possui um efeito positivo no que se refere à qualidade dos grãos produzidos à medida que níveis crescentes de Se foram acumulados nesses grãos. As doses de Se utilizadas alteraram significativamente o seu acúmulo nos grãos. A altura de inserção do 1º legume, peso de 100 sementes e acúmulo de selênio foram alteradas significativamente em função das formas de aplicação do Selênio. A aplicação do selênio na forma de selenito de sódio via foliar na cultura da soja promoveu o acúmulo crescente desse elemento nos grãos, embora tenha propiciado um efeito fitotóxico em todas as doses utilizadas nesse trabalho. Verificou-se também inviabilidade do uso do selênio via semente nas condições testadas para processos de biofortificação agrônômica, devido a processos fitotóxicos.

Palavras-chave: Fitotoxidez. Selenato. Selenito. Doses. Formas de aplicação.

GENERAL ABSTRACT

The aim of this work was to identify the best source, dose and application form of selenium and to evaluate the influence on agronomic traits of soybeans in order to promote its biofortification. Four experiments were conducted to this end. The first two were installed in a randomized block design in a factorial 2x5x3. The treatments consisted of two cultivars (BRS Favorita RR and Pioneer P98Y11 RR), 5 doses of selenium (0; 10; 20; 30 and 40 g.ha⁻¹) in the form of sodium selenate and three forms of application (foliar, soil and seed) in two different locations. The plots were constituted by 4 lines of 5 m, spaced by 50cm eliminating 0.50 meters at the ends of each row, with a density of 15 plants / meter, using as useful area the two central rows. Plant and first pod height, number of pods per plant, number of grains per pod, 100 seed mass, lodging, grain yield and selenium accumulation in grains were analyzed. The third experiment was conducted in the field in a completely randomized block design scheme with the treatments comprising: 7 doses of selenium (0, 10, 20, 40, 60, 120, and 200) g.ha⁻¹ (sodium selenite) foliar application with 3 repetitions. The application was made on the soybean plants at the R4 reproductive stage using the BRS Favorita RR cultivar. The experimental plots for analysis consisted of 4 rows with 5 m length spaced 50 cm using the two central rows with the elimination of 0.50 meters at the end of each row. The analyzed traits were: first pod insertion and plant height, yield and accumulation of selenium in grains. And the last experiment was conducted in the laboratory in order to evaluate the effect of Se doses in the germination of soybean seeds. A completely randomized design with four replications in a 2x2x6 factorial structure was used, 2 cultivars (BRS Favorita RR and Pioneer P8Y11 RR), 6 doses of Se (0; 0.05; 0.1; 0.2; 0.3; 0.6 g. L⁻¹) and two selenium sources (selenate and selenite). Evaluations were made on the seventh day counting the number of germinated seeds. Field experiments conducted with application of sodium selenate evidenced that this element has a positive effect with regard to the quality of the grain produced as increasing levels of Se were accumulated in these grains. Selenium doses used significantly altered its accumulation on grains. First pod insertion height, 100 seed weight and accumulation of selenium were significantly altered depending on the application forms of selenium. Foliar application of selenium as sodium selenite in soybean promoted the accumulation of the element in the grain, although promoted a phytotoxic effect at all doses used on the experiment. It was also verified the impossibility of use of selenium via seed under the tested conditions for agronomic biofortification processes, due to phytotoxic processes.

Keywords: Phytotoxicity. Selenate. Selenite. Doses. Application forms.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 2

Figura 1	Variação da altura de plantas (cm) em função da aplicação de diferentes doses selenato de sódio via sementes, obtidos no experimento biofortificação agronômica da soja, Lavras – MG - 2013.....	50
Figura 2	Variação do peso de 100 sementes (em gramas) de soja em função da aplicação de diferentes doses selenato de sódio, dentro da forma de aplicação desse elemento, em dois locais diferentes Lavras-MG – 2013.....	61
Figura 3	Variação do rendimento de grãos de soja cultivar P98Y11RR em função da aplicação de diferentes doses selenato de sódio na área experimental do Departamento de Agricultura da UFLA, Minas Gerais – 2013.....	66
Figura 4	Variação do acúmulo de selênio dos grãos de soja em função de doses de selenato de sódio aplicadas de três diferentes formas no experimento biofortificação agronômica da soja, Lavras – MG – 2013.....	69

CAPÍTULO 3

Figura 1	Plantas de soja da cv. BRS Favorita RR, apresentando efeito fitotóxico crescente com o aumento da dose de selenito de sódio aplicado via foliar (0; 10; 20; 40; 60; 120 g.ha ⁻¹).....	88
Figura 2	Variação do acúmulo de selênio nos grãos de soja em (mg.kg ⁻¹) de acordo com a variação das doses de selenito de sódio em (g.ha ⁻¹) Itutinga -MG-2010/2011.....	89

CAPÍTULO 4

Figura 1	Porcentagem de germinação em relação às doses de selênio aplicadas (0; 0,05; 0,1; 0,2; 0,3; 0,6 g. L ⁻¹ de selênio em água) no experimento, Influência da biofortificação agronômica com selênio na germinação de sementes de soja. Lavras –MG – 2013.....	105
Figura 2	Efeitos da interação de fontes de Se (Na ₂ SeO ₃ e Na ₂ SeO ₄) com 6 doses de Se (0; 0,05; 0,1; 0,2; 0,3; 0,6 g. L ⁻¹ de selênio em água); no poder germinativo das sementes de soja no experimento, Influência da biofortificação agronômica com selênio na germinação de sementes de soja. Lavras - MG -2013.....	107

Figura 3	Efeitos da interação de duas cultivares de soja (EMBRAPA BRS Favorita RR e Pioneer P98Y11 RR), com seis doses de selênio (0; 0,05; 0,1; 0,2; 0,3; 0,6 g. L ⁻¹) em água no experimento, Influência da biofortificação agrônômica com selênio na germinação de sementes de soja. Lavras - MG -2013.....	108
Figura 4	Efeitos da interação de duas cultivares de soja (EMBRAPA BRS Favorita RR e Pioneer P98Y11 RR), duas fontes de Se (Na ₂ SeO ₃ e Na ₂ SeO ₄) com seis doses de selênio (0; 0,05; 0,1; 0,2; 0,3; 0,6 g. L ⁻¹) em água no experimento, Influência da biofortificação agrônômica com selênio na germinação de sementes de soja. Lavras-MG- 2013.....	109

LISTA DETABELAS

CAPÍTULO 2

Tabela 1	Características químicas das amostra de solo da área experimental do Departamento de Agricultura da UFLA (A) Lavras, e do Centro de Desenvolvimento Científico e Tecnológico em Agropecuaria da UFLA (CDCTA)(B)-MG,2011.....	39
Tabela 2	Resumo da análise de variânciados dados relativos à altura de plantas (Alt Plan), altura de inserção do primeiro legume (Alt Leg), número de legumes por planta (NI Plan), número de sementes por legume (Ns Leg), acamamento (Aca), peso de 100 sementes (Pcs), rendimento de grãos (Rend), acúmulo de selênio nos grãos (ASe), obtidos no experimento biofortificação agrônômica da soja, Lavras – MG - 2013.....	46
Tabela 3	Resultados médios da altura de plantas em centímetros de duas cultivares de soja cv. BRS Favorita RR e cv. Pioneer P98Y11 RR obtidos no experimento biofortificação agrônômica da soja, Lavras – MG - 2013.....	48
Tabela 4	Resultados médios da inserção do primeiro legume (cm) de duas cultivares de soja cv. BRS Favorita RR e cv. Pioneer P98Y11 RR obtidos no experimento biofortificação agrônômica da soja, Lavras – MG - 2013.....	51
Tabela 5	Resultados médios do acamamento de plantas duas cultivares de soja cv. BRS Favorita RR e cv. Pioneer P98Y11 RR dentro de cada dose e cada forma de aplicação de Se, dos experimentos biofortificação agrônômica da soja, Lavras – MG - 2013.....	54
Tabela 6	Resultados médios de número de legumes por planta de duas cultivares de soja (cv. BRS Favorita RR e cv. Pioneer P98Y11 RR) dentro de cada dose e cada forma de aplicação de Se, do experimento biofortificação agrônômica da soja, Lavras – MG - 2013.....	55
Tabela 7	Resultados médios de número de grãos por legumes de duas cultivares de soja cv. BRS Favorita RR e cv. Pioneer P98Y11 RR obtidos no experimento biofortificação agrônômica da soja, Lavras – MG - 2013.....	57

Tabela 8	Resultados médios do peso de 100 sementes em g de duas cultivares de soja cv. BRS Favorita RR e cv. Pioneer P98Y11 RR obtidos no experimento biofortificação agronômica da soja, Lavras – MG - 2013.....	58
Tabela 9	Resultados médios do rendimento de grãos em kg.ha ⁻¹ de duas cultivares de soja cv. BRS Favorita RR e cv. Pioneer P98Y11 RR dentro de cada dose e cada forma de aplicação de Se, do experimento biofortificação agronômica da soja, Lavras – MG - 2013.....	64
Tabela 10	Resultados da análise de variância do desdobramento de local dentro de cada cultivar para os níveis de selênio, no experimento biofortificação agronômica da soja, Lavras – MG - 2013.....	65
Tabela 11	Resultados da análise de variância do desdobramento de doses dentro de formas de aplicação obtidas no experimento Biofortificação agronômica da soja, Lavras – 2013.....	69
CAPÍTULO 3		
Tabela 1	Resultados das análises químicas de solo nas amostras coletadas na profundidade 0 - 20 cm, na Fazenda Milanez no município de Itutinga - MG, 2010.....	83
Tabela 2	Resumo das análises de variância dos dados relativos à altura de plantas (Alt Plan), altura de inserção do primeiro legume (Alt Leg), rendimento de grãos (Rend) e acúmulo de selênio nos grãos (ASe), obtidas no experimento biofortificação agronômica da soja com selenito de sódio, via adubação foliar. Itutinga -MG 2010-2011.....	87
CAPÍTULO 4		
Tabela 1	Resumo de análise de variância para percentagem de germinação nos diferentes tratamentos do experimento, Influência da biofortificação agronômica com selênio na germinação de sementes de soja. Lavras-MG -2013. Lavras-MG -2013.....	102
Tabela 2	Resultados médios da germinação (%) de sementes de soja para diferentes fontes de selênio, dentro de cada dose e cultivar no experimento, Influência da biofortificação agronômica com selênio na germinação de sementes de soja. Lavras - MG -2013.....	103

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	
1	INTRODUÇÃO GERAL 15
2	REFERENCIAL TEÓRICO 17
2.1	O selênio e sua importância na biofortificação 14
2.2	Adubação com selênio 21
2.3	O selênio em algumas culturas 24
	REFERÊNCIAS 29
CAPÍTULO 2 BIOFORTIFICAÇÃO AGRONÔMICA DA SOJA COM SELENATO DE SÓDIO. DOSES E FORMAS DE APLICAÇÃO 34	
1	INTRODUÇÃO 37
2	MATERIAIS E MÉTODOS 38
2.1	Caracterização das áreas experimentais 38
2.2	Delineamento experimental e tratamentos avaliados 40
2.3	Instalação e condução dos experimentos 41
2.4	Características avaliadas e análise estatística dos dados fenotípicos 42
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO 45
3.1	Altura da planta (AltPlan) 47
3.2	Altura do primeiro legume (AltLeg) 51
3.3	Número de legumes por planta (NIPlan), número de sementes por legume (Nsleg) e Acamamento (Aca) 52
3.4	Peso de 100 sementes (Pcs) 57
3.5	Rendimento de grãos (Rend) 63
3.6	Acúmulo de selênio (ASe) 68
4	CONCLUSÕES 74
	REFERÊNCIAS 75
CAPÍTULO 3 BIOFORTIFICAÇÃO AGRONÔMICA DA SOJA COM SELENITO DE SÓDIO VIA ADUBAÇÃO FOLIAR 78	
1	INTRODUÇÃO 81
2	MATERIAL E MÉTODOS 83
2.1	Caracterização da área experimental 83
2.2	Delineamento experimental e tratamentos analisados 84
2.3	Instalação e condução dos experimentos 84
2.4	Características avaliadas e análise estatística 85
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO 87
4	CONCLUSÕES 91
	REFERÊNCIAS 92

CAPÍTULO 4 INFLUÊNCIA DA BIOFORTIFICAÇÃO AGRONÔMICA COM SELÊNIO NA GERMINAÇÃO DE SEMENTES DE SOJA...		95
1	INTRODUÇÃO	98
2	MATERIAL E MÉTODOS	100
2.1	Caracterização da área experimental	100
2.2	Delineamento experimental e tratamentos	100
2.3	Instalação e condução do experimento	100
2.4	Características avaliadas e análises estatísticas dos dados fenotípicos	101
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	102
4	CONCLUSÕES	111
	REFERÊNCIAS	112

1 INTRODUÇÃO GERAL

O selênio é um micronutriente essencial para os seres humanos e animais, mas esse elemento não faz parte dos nutrientes essenciais às plantas superiores. Diversos estudos em relação a esse elemento são de grande interesse já que o mesmo possui propriedades antioxidantes e anticancerígenas. A formação de anticorpos como resposta a vacinas, controle do metabolismo de hormônios, influência no desempenho reprodutivo e doenças cardiovasculares, muitas vezes estão relacionados com os teores de selênio presente nos alimentos. (COELHO; BACCAN, 2004).

O enriquecimento de alimentos com esse nutriente, principalmente vegetais e seus derivados, é o ponto principal de trabalhos atualmente. Hoje é necessário permitir que a população tenha acesso a uma dieta diversificada de alimentos, aliados a características nutritivas melhoradas dos mesmos, principalmente a partir do processo denominado biofortificação. Grande parte da população mundial vive em regiões onde o solo apresenta um desbalanço mineral, o que pode caracterizar a falta frequente de nutrientes essenciais como ferro, zinco, cálcio, magnésio, cobre, iodo e o selênio na própria alimentação.

Uma das principais alternativas é aumentar as concentrações desses minerais nos cereais e vegetais de maior consumo, o que pode ser realizado através da adubação mineral das culturas ou do melhoramento genético das mesmas. Esses dois processos são denominados hoje como o processo de biofortificação.

Evidências científicas mostram que a biofortificação possui um grande potencial para aumentar a biodisponibilidade de elementos minerais nos alimentos provenientes das culturas sem comprometer a produtividade das mesmas. Nesse caso é necessário definir a melhor maneira do uso de diversas

fontes e níveis de microelementos. No caso específico do selênio, há necessidade de definir doses, fontes e formas de aplicação do mesmo nas culturas. Em países em desenvolvimento, a biofortificação requer um aumento em investimento público nas pesquisas e extensão para garantir seu sucesso, o que está relacionado com o desafio de fazer com que consumidores e produtores aceitem as novas variedades biofortificadas e assim aumentem o consumo dos nutrientes alvos.

A soja é um dos alimentos de maior consumo mundial animal e humano, por ser uma das mais importantes fontes de proteína vegetal, além da gordura utilizada para produção de biocombustíveis. Essa cultura apresenta também características fitoquímicas benéficas, sendo por todas essas características tomada como a cultura referência no desenvolvimento desse trabalho.

O presente trabalho teve como objetivo estudar a biofortificação agronômica com selênio, identificando as doses, formas de aplicação e o efeito nas características agronômicas da cultura da soja.

Para isso procurou-se:

- a) Definir, a melhor dose e forma de aplicação de selênio na cultura da soja, usando como fonte o selenato de sódio (Na_2SeO_4) com o intuito de promover a biofortificação, bem como avaliar a sua influência em caracteres agronômicos da cultura;
- b) Verificar os efeitos da adubação foliar selenito de sódio (Na_2SeO_3) na biofortificação agronômica em alguns caracteres agronômicos da soja;
- c) Determinar a influência do selênio na germinação de sementes de soja, visando a possibilidade de biofortificar agronomicamente essa cultura.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Os minerais são fundamentais para a realização das atividades metabólicas nos organismos e cada vez mais são fontes de pesquisa, principalmente dentro da área nutricional tanto de seres humanos quanto de animais e plantas.

2.1 O selênio e sua importância na biofortificação

O selênio além de ser um elemento traço, importante e essencial para o homem e os animais devido ao seu valor nutricional, é fonte de estudos de interesse em vários países levando em consideração suas propriedades anticancerígenas e antioxidantes, principalmente dentro dos programas de biofortificação em diferentes tipos de alimentos e culturas (RIOS et al., 2010).

White e Broadley (2009) mostraram que existem duas técnicas as quais têm sido adotadas com sucesso para aumentar a biodisponibilidade ou concentrações biodisponíveis de elementos minerais nos alimentos provenientes de culturas. A primeira aproximação é a agrônômica, a qual procura aperfeiçoar a utilização de fertilizantes minerais e/ou melhorarem a solubilização e mobilidade de elementos minerais no solo e nas plantas, respectivamente. Em segundo lugar, as culturas estão sendo desenvolvidas ou melhoradas para incrementar a habilidade de absorver elementos minerais e acumulá-los.

Nas plantas, o selênio apresenta propriedades químicas semelhantes às do enxofre e por isso partilham vias metabólicas em comum. A presença de compostos isólogos nas plantas indica que esses elementos competem em processos biológicos que afetam a absorção, translocação e assimilação nos processos de crescimento das plantas (SORS; ELLIS; SALT, 2005).

As plantas apresentam capacidades diferenciadas de absorção e acúmulo de Se do solo, onde esse elemento é encontrado principalmente como selenato e selenito, embora possam existir também, selênio elementar, seleneto e formas orgânicas de selênio segundo Kabata-Pendias e Pendias (1999 citado por (HAWRYLAK; SZYMAŃSKA, 2004).

Esse elemento mostrou ser benéfico no crescimento e qualidade das plantas devido a seus efeitos antioxidantes conforme Hartikainen (2005, citado por KESKINEN, 2012). Os teores de Se nas plantas, animais e seres humanos, numa determinada região, estão diretamente relacionados com o conteúdo desse elemento no solo, que por sua vez está relacionado com a pedologia, gênese e localização, nas áreas de cultivo (WILLIAMS et al., 2009). Assim as plantas possuem um papel essencial na transferência do Se do solo para dentro da cadeia alimentar de acordo com Girling (1984 citado por KESKINEN, 2012), (COMBS, 2001; HAWKESFORD; ZHAO, 2007).

O selenato, um análogo do sulfato é transportado pela família dos transportadores de sulfato dentro das plantas. Algumas espécies são capazes de acumular altas concentrações internas de Se (hiperacumuladoras). Entretanto, existe uma variação genética muito pequena na habilidade de acúmulo entre as espécies não acumuladoras como os cereais. Dentro dos tecidos das plantas, o selênio entra nos atalhos da assimilação e metabolismo do sulfato, substituindo a cisteína e a metionina nas proteínas. Alternativamente, o Se poderá ser acumulado como derivados metilados ou volatilizados da planta (HAWKESFORD; ZHAO, 2007).

Desde 1984 há estudos que indicam a necessidade da suplementação dos fertilizantes com selênio. Em 1998, o Ministério de Agricultura e Florestas Finlandês aumentou o nível de suplementação de selênio nos fertilizantes devido à baixa concentração desse elemento no solo, nos fertilizantes e nos alimentos (EUROLA; AL, 2003). Um estudo realizado na Finlândia verificou mudanças

no conteúdo de selênio em diferentes produtos como o leite, queijo e ovos. De acordo com os programas de adubação, contínuos feitos nesse país por mais de uma década, a adubação com selênio tem causado um múltiplo incremento no conteúdo de selênio nos alimentos. A média de consumo de Se na Finlândia aumentou em quatro vezes em comparação aos anos setenta. Os produtos lácteos e os ovos contribuíram com aproximadamente 30% do incremento total de consumo de selênio (EKHOLM et al., 1991). Segundo Eurola et al. (1990), a contribuição para o incremento do conteúdo de selênio nos cereais para aquela época foi em torno de 18%.

Lyons et al. (2004 citados por GOMEZ-GALERA et al., 2010) indicam que a aplicação de selênio seja, provavelmente, o exemplo mais bem sucedido de intervenção agrônômica pela adubação mineral devido ao fato de preencher os três principais requisitos para trabalhar com a estratégia de biofortificação. O primeiro é que o selenato de sódio é altamente móvel em muitos tipos de solo. Segundo, o selenato de sódio é absorvido facilmente pelas plantas, acumula-se facilmente nos grãos e, por último, o selênio se acumula de uma maneira prontamente biodisponível na forma de selênio metionina e selênio cisteína.

Pode ser possível também enriquecer culturas em longo prazo pela seleção de variedades melhoradas com um incremento e melhoria das características de acúmulo do Se (Biofortificação genética). Terry et al. (2000) e Sors et al. (2005) citados por Gomez-Galera et al. (2010) indicam que não existe na atualidade plantas transgênicas modificadas para aumentar o acúmulo do selênio. Um número atrativo de genes promissores, entretanto, têm sido identificados no processo da assimilação do enxofre, no qual o Se é quimicamente metabolizado da mesma maneira. Esse processo permite às plantas absorver, acumular e volatilizar o selênio. O passo da volatilização deve então ser inibido para promover o acúmulo do selênio sem afetar o metabolismo do enxofre. A ATP-sulfurilase é uma enzima que limita a percentagem da

redução e acúmulo nas plantas, e através da sobre expressão do gene da enzima poderá ser promovido o acúmulo do selênio como relatado por Pilon et al. (1999 citado por GOMEZ-GALERA et al., 2010). Segundo Hirschi (2009), tradicionalmente as técnicas agronômicas podem incrementar marginalmente os valores nutricionais de alguns alimentos e indica que os avanços na biologia molecular estão explorando rapidamente o desenvolvimento de culturas para o incremento do acúmulo de nutrientes.

Bouis e Welch (2010) manifestam que através de uma aliança global interdisciplinar de instituições científicas e através da implementação de agências nos países em desenvolvimento e desenvolvidos, pode-se chegar a resultados mais satisfatórios quando se tem como objetivo a biofortificação. A biofortificação de culturas oferece uma intervenção de base rural que, pelo seu desenho, inicialmente alcançaria as populações mais remotas as quais fazem parte da maioria dos desnutridos em muitos países. Posteriormente, atingiria as populações urbanas, à medida que os produtos provenientes desse processo fossem comercializados.

No Brasil, trabalhos dessa natureza são escassos, existindo ainda um indicativo de baixo consumo. É importante, portanto, manter-se atento à possibilidade de deficiências de selênio na população brasileira, particularmente nos grupos de baixo poder aquisitivo, que não consomem produtos de origem animal com frequência (FERREIRA et al., 2002). Como se pode observar, são necessários estudos mais específicos para a introdução desse elemento nos alimentos. A adoção de algumas estratégias como definição de doses, formas de aplicação e fontes de Se poderão proporcionar um consumo adequado desse elemento pelos humanos e animais.

2.2 Adubação com selênio

O selênio do solo pode ser utilizado como um dos indicadores da quantidade de selênio em animais e humanos. Não é a melhor técnica de indicação, entretanto, uma vez que a disponibilidade para as plantas e, conseqüentemente, para os animais, depende de outros fatores, como a forma química de ocorrência no solo, acidez ativa (pH), entre outros (COMBS, 2001). A aplicação de sulfatos às culturas, por exemplo, via gesso agrícola ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), diminui a disponibilidade de selênio nos alimentos, uma vez que o sulfato e o selênio atuam antagonicamente no solo (WHITE; BROADLEY, 2009). Stroud et al. (2010) relataram que muito pouco do selênio aplicado no solo de forma líquida ou granulada teve efeito residual após a colheita da cultura de trigo. A adubação com o selenato de sódio em até 20 g ha^{-1} não proporcionou acúmulo significativo no solo, sugerindo assim, perdas de selênio. Muitos estudos têm mostrado que a forma selenato, quando comparada com selenito, é a melhor opção para uso como fertilizante, sendo os selenatos de sódio e bário também usados.

Segundo Lyons (2010), no Reino Unido, um estudo metodológico de fertilizantes investigou formas de aperfeiçoar a aplicação de selênio com o propósito de biofortificação. Foi calculado que a aplicação de uma pequena quantidade de 10 g Se/ha^{-1} , na forma de selenato, poderá incrementar a concentração de selênio nos grãos de trigo de 30 a 300 ng.g^{-1} . O mesmo autor indica que o programa de adubação na Finlândia terá um grande efeito no “status” da concentração de selênio na população daquele país.

Haug et al. (2007) e Lyons (2010) indicam também que a taxa de recuperação desse elemento é muito baixa (apenas 14%), e pode ser discutível de que em larga escala, a biofortificação com selênio poderá ser um desperdício de um elemento traço relativamente escasso. Há necessidade de verificar as

doses certas para a acumulação do selênio em diversos tipos de plantas climas e solos.

Segundo o mesmo estudo, Broadley et al. (2010) e Lyons (2010) verificaram resultados com trigo de inverno durante dois anos consecutivos em 10 locais diferentes, fazendo adubação de selênio na forma de selenato de sódio com doses de alto volume ou de forma granulada. A produtividade e os índices de colheita não foram afetados pela adubação de selênio. Em todos os tratamentos, a aplicação de $1 \text{ g} \cdot \text{ha}^{-1}$ de Se aumentou a concentração de selênio nos grãos de 16-26 $\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$ de peso da matéria. O trabalho indica que uma aplicação de $10 \text{ g} \cdot \text{ha}^{-1}$ dentro do ambiente atual no Reino Unido aumentará em dez vezes os níveis atuais, proporcionando a biofortificação agrônômica do trigo nesse país. Eles mostraram uma recuperação do selênio aplicado em torno de 20-35% do total, nos grãos e na palhada.

Preocupações quanto ao acúmulo de selênio no solo após adubações contínuas tem sido verificada. Então, formas de aplicações alternativas talvez possam se tornar promissoras, como por exemplo, adubação foliar. Aplicações foliares de selenato de sódio a cada 10 dias, em doses de 10 mg Se L^{-1} na época do florescimento do feijoeiro em quatro cultivares diferentes, permitiram o acúmulo de $2 \mu\text{g g}^{-1}$ na matéria seca das sementes desta cultura (POLONA et al., 2007).

No solo o selenato é reduzido pelos microrganismos às formas menos disponíveis para as plantas em algumas semanas, o que aumenta a segurança da aplicação do respectivo elemento (EUROLA et al., 2003). Talvez o maior problema desse sistema possa ser a possível contaminação de certas fontes de água ou do próprio solo. Diferentes métodos foram desenvolvidos para incorporar o selênio às misturas dos fertilizantes.

Na Finlândia, uma solução com água a 10%, tanto de selenato de sódio como de potássio, é preparada como solução estoque, da qual é retirada uma

solução a 1%, para então ser adicionada ao fertilizante (EUROLA et al., 2003). A solução de selenato é adicionada com o intuito de fornecer um nível de 10 gramas de selênio por tonelada de fertilizante.

Na Nova Zelândia, o selenato é incorporado em aglomerados contendo 1% de selênio (peso /peso) e esses são então aplicados em doses de 0,5 a 1,0 kg por hectare, o que equivale à aplicação de 5-10 g de selênio por hectare em pastagem ou culturas. Pesquisas recentes incluem a produção de adubos de liberação lenta. A aplicação de doses de 0,5 a 1,0 kg por hectare suplementa a forragem por dois anos nas condições da Nova Zelândia (EUROLA et al., 2003).

Segundo Aspila (2005), alguns proprietários preferem aplicar o fertilizante selenizado em faixas de terra, em relação à aplicação a lanço. Nestas condições, a quantidade correta de selênio é prevista para toda a área a ser adubada. Experimentalmente isto tem sido feito em faixas pequenas de até 5% do total da área a ser adubada. No entanto, é recomendado que 25% da pastagem seja adubada para assegurar que os animais possam se alimentar das pastagens enriquecidas com Se. A toxicidade não aparenta ser um problema, desde que os animais em pastejo igualem o seu consumo de selênio com consumo de uma mistura de forragens selenizadas e não selenizadas.

A melhor forma de aplicação de selênio tem sido a utilização de formas de liberação rápida (Selenato de sódio) tem-se a melhor forma de aplicação do selênio. Situações onde sinais visíveis de deficiência não ocorram, o nível de selênio no sangue dos animais em pastejo deverá ser mantido em 60 ppb (0,06 mg de Se x L⁻¹). Nessas condições, os bovinos tratados mostram aumento de 10% de ganho de peso e 5% de incremento na produtividade em relação aos animais não tratados. Em situações onde os sintomas de deficiência de selênio aparecem, as doses aplicadas poderão apresentar respostas de maior amplitude. Os fertilizantes selenizados terão maior eficiência se aplicados na época de adubação adequada, junto com o nitrogênio, fósforo e potássio. O fertilizante

selenizado poderá ser adicionado ao solo em duas vezes, sendo uma na primavera e a outra por ocasião das chuvas, quando ocorre a rebrota das forrageiras. Utilizando-se produtos de liberação lenta, uma só aplicação na primavera é suficiente (EUROLA et al., 2003).

Em condições finlandesas, uma única aplicação tem sido suficiente para incrementar o conteúdo de selênio a níveis desejados. Quando esse é aplicado como indicado nos fertilizantes, supre a necessidade dos animais e elimina as outras formas de aplicação (EUROLA; HIETAMNIEMI, 2005). Por outro lado, pesquisadores concentram seus estudos na descoberta da habilidade de certas plantas em absorver o selênio do solo.

2.3 O selênio em algumas culturas

A distribuição de Se nas várias partes da planta difere de acordo com as espécies, fase de desenvolvimento e condições fisiológicas. Em plantas acumuladoras de Se, esse é acumulado em folhas jovens durante a fase vegetativa. Durante a fase reprodutiva são encontrados níveis altos de Se em sementes, enquanto o seu conteúdo em folhas é drasticamente reduzido. Cereais não acumuladores, quando amadurecem, frequentemente mostram o mesmo conteúdo de Se em grãos e raízes e quantidades menores nos caules e folhas. A distribuição de Se em plantas também depende da fonte, concentração e disponibilidade às raízes, natureza e concentração de outras substâncias, especialmente sulfatos acompanhando o elemento (SOUZA et al., 1998; ZAYED; LYTLE; TERRY, 1998).

Yang et al. (2003) realizaram dois experimentos instalados em campo, em regiões diferentes da China na cultura da soja usando o selenito de sódio como a fonte de selênio. O primeiro em um solo que foi classificado como topsoil, com pH de 6.5, onde foram aplicadas doses de $300\text{g Se}\cdot\text{ha}^{-1}$ ou 240 mg

Se.L⁻¹ e mais um fertilizante enriquecido na mesma proporção. O segundo tratamento sendo a aplicação foliar de 200g Se.ha⁻¹ ou 180 mg Se.L⁻¹ em solução com água, além de um fertilizante enriquecido com selênio com as mesmas doses. O segundo experimento foi conduzido também na China em outra localidade, com outras duas cultivares em um solo classificado como topsoil com pH de 8.1. Utilizou-se a aplicação foliar de selênio com 200 g Se.ha⁻¹ ou 180 mg Se.L⁻¹ de selenito de sódio e dessa vez também o fertilizante enriquecido foi aplicado na fase de produção de legumes no mesmo ano. As aplicações realizadas via solo e via foliar apresentaram efeito acumulativo significativo no conteúdo e acúmulo de selênio e proteína por parte da cultura. O conteúdo de selênio foi incrementado de 0,028 até 0,191 µg.g⁻¹ pela aplicação de selênio no solo e de 1,126 - 1,211 µg.g⁻¹ com aplicação foliar. As aplicações foliares de selênio foram mais eficientes do que as aplicações no solo para o incremento do selênio no grão já que pode ser diretamente transferido e acumulado.

Outro fator levado em consideração foi que a soja plantada no solo mais ácido (pH de 6,5) resultou no selênio sendo ligado às substâncias insolúveis e não disponível às plantas facilmente (YANG et al., 2003). Não foram encontradas diferenças significativas entre o selenito de sódio e o fertilizante enriquecido com selênio. No entanto, a soja produzida com a forma de aplicação via foliar mais o fertilizante enriquecido com selênio acumulou 7,5% mais selênio do que aquelas doses aplicadas somente com selenito. Ocorreu também um acúmulo maior de proteínas nas plantas de soja tratadas com selênio comparando com aquelas que não foram tratadas. O conteúdo de selênio das proteínas foi de 12, 063 -16, 770 µg.g⁻¹, duas vezes mais do que a soja padrão. As cultivares utilizadas apresentaram habilidade diferencial de acúmulo de selênio pelos grãos da soja. Esse resultado poderia ter sido causado pela variação da síntese de selenoproteínas entre os genótipos da soja. Também foi verificado que o conteúdo de selênio na soja com a aplicação via foliar de fertilizante

enriquecido com selênio foi de 2-10% maior do que o conteúdo da solução de selenito de sódio (YANG et al., 2003).

Para determinar o papel do comportamento biológico do acúmulo do selênio pela cultura da soja, experimentos em solução de Hoagland foram conduzidos. Foram utilizadas soluções de selenito e selenato, duas cultivares de soja com genótipos diferentes (ZHANG et al., 2003). Na presença do selenito, a medida que se aumentava a concentração de Se, o acúmulo pelas raízes e brotações exibiram um incremento linear com o tempo de crescimento, numa concentração de $5\mu\text{M}$. Na presença do selenato, contudo, a resposta linear para o aumento no tempo foi somente válido pelas primeiras 24 horas de crescimento. Resultados obtidos evidenciam que o acúmulo na raiz de Se foi mais lento sob o efeito de selenato do que selenito no experimento de sequência no tempo, enquanto os níveis de selênio nas brotações foram semelhantes entre os dois tratamentos.

No experimento de concentrações crescentes, as respostas nas raízes e nos brotos foram lineares às concentrações das soluções de selênio indiferentemente das formas de selênio fornecidas. Neste experimento, ocorreu uma discrepância muito grande dos níveis de selênio na raiz e nos brotos entre as duas cultivares (ZHANG et al., 2003). Comparativamente, não se encontraram diferenças nas proporções de concentrações entre as cultivares de soja. Sendo já definido, não somente as formas de suprimento de selênio, mas também os diferentes tipos de genótipos afetam a biodisponibilidade. Isso deveria ser levado em consideração para a determinação da alta eficiência de acúmulo de selênio por parte das diferentes cultivares de soja para melhorar o suprimento ou inclusão do selênio na cadeia alimentícia (ZHANG et al., 2003).

As plantas de soja quando pulverizadas com selenato de sódio conseguem incorporar o selênio nas suas reações fisiológicas para que ele possa atuar como agente antioxidante. Esse processo ocorre em muitas outras plantas

através da associação do aumento da atividade enzimática da superóxido dismutase e da glutatiónperoxidase (DJANAGUIRAMAN et al., 2005). Isso foi determinado testando a habilidade por parte da cultura para retardar a senescência relacionada ao estresse oxidativo. As plantas foram pulverizadas com selenato de sódio numa concentração de 50 mg L^{-1} após 78 dias do plantio. As folhas que foram colhidas após os 90 dias para análise da atividade antioxidativa mostraram que o Se promoveu o crescimento e atuou como agente antioxidante pela inibição da peroxidação lipídica e a percentagem de injúria da membrana celular das células. Estes conteúdos de enzimas foram positivamente correlacionados com o conteúdo de selênio. A redução das enzimas antioxidativas aos 90 dias foi muito mais rápida nas plantas controle do que as plantas pulverizadas com selênio.

Como um exemplo da ação antioxidativa, pode-se verificar também os resultados obtidos por Rios et al. (2008) que verificaram a forma de acúmulo de selênio nas plantas de alface (*Lactuca sativa* L. cv *Philipus*) e ao mesmo tempo a capacidade antioxidativa foliar. Depois que diferentes taxas de selenito e selenato de sódio foram aplicadas (5, 10, 20, 40, 60, 80, $120 \mu \text{ mol L}^{-1}$), a biomassa foliar, a peroxidação lipídica, a acúmulo de selênio, os compostos antioxidantes e a capacidade antioxidante foi analisada. Os resultados mostraram que a forma menos tóxica para esta cultura foi o selenato que induziu ao mesmo tempo à produção de uma maior quantidade de biomassa, maior acúmulo de selênio e maior quantidade de compostos antioxidantes do que o selenito. O tratamento de $40 \mu \text{ mol L}^{-1}$ mostrou-se a maneira mais adequada para as plantas de alface, à medida que a capacidade antioxidante e acúmulo de selênio aumentaram sem diminuir a biomassa, e fazendo que essas plantas se apresentassem mais saudáveis do que em comparação com as plantas controle. Finalmente, em relação ao teste da capacidade antioxidante usada (capacidade de redução férrica do plasma (FRAP), 2,2 difenil-1-picril-hidrazil (DPPH) e o

poder redutor), somente o FRAP mostrou uma relação significativa com os diferentes compostos antioxidantes, enquanto o ascorbato refletiu melhor o efeito do selênio na capacidade antioxidante sob condições experimentais (RIOS et al., 2008).

Levando em conta que a cultura da soja é uma das mais expressivas não só no Brasil como no mundo, trabalhos de biofortificação devem ser incrementados no sentido de promover acúmulo de diversos elementos alvos nos grãos, visando posterior aproveitamento pela população humana e animal.

REFERÊNCIAS

ASPELI, P. History of selenium supplementend fertilization in Finland. In: TWENTY YEARS OF SELENIUM FERTILIZATION, 2005, Helsinki. **Proceedings**... Helsinki: MTT Agrifood Research Finland, 2005. p. 8-13. Agrifood Research Reports, 69). Disponível em: <<http://www.mtt.fi/met/pdf/met69.pdf>>. Acesso em: 10 abr. 2013.

BOUIS, H. E.; WELCH, R. M. Biofortification-A sustainable agricultural strategy for reducing micronutrient malnutrition in the global south. **Crop Science**, Madison, v. 50, n. 2, p. S20-S32, mar./abr. 2010. Disponível em: <<http://www.scienceforum2009.nl/Portals/11/2WelchBouisBiofortification.pdf>> Acesso em: 10 mar. 2013.

BROADLEY, M. R. et al. Selenium biofortification of high-yielding winter wheat (*Triticum aestivum* L.) by liquid or granular Se fertilisation. **Plant and Soil**, The Hague, v. 332, n. 1-2, p. 5-18, 2010.

COELHO, N. M. M.; BACCAN, N. Determinação de ultratraços de selênio em urina por geração de hidretos e espectrometria de absorção atômica em fluxo. **Eclética Química**, Marília, v. 29, n. 1, p. 7-14, 2004.

COMBS, F. G. Selenium in global food systems. **British Journal of Nutrition**, Cambridge, v. 85, n. 5, p. 517-547, May 2001. Disponível em: <<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/11348568>>. Acesso em: 10 fev. 2013.

COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais**: 5ª aproximação. Viçosa, 1999. 359 p.

DJANAGUIRAMAN, M. et al. Selenium - an antioxidative protectant in soybean during senescence. **Plant and Soil**, The Hague, v. 272, n. 1-2, p. 77-86, May 2005.

EKHOLM, P. et al. Effects of general soil fertilization with sodium selenate in finland on the selenium content of milk, cheese and eggs. **Milchwissenschaft = Milk Science International**, Munchen, v. 46, n. 9, p. 547-550, 1991.

EUROLA, M.; HIETAMNIEMI, V. Twenty years of selenium fertilization, v. 69, p. 110, 2005. Disponível em: <<http://jukuri.mtt.fi/bitstream/handle/10024/459975/met69.pdf?sequence=1#page=26>>. Acesso em: 10 mar. 2013.

EUROLA, M. et al. Effects of selenium fertilization on the selenium content of cereal-grains, flour, and bread produced in finland. **Cereal Chemistry**, Saint Paul, v. 67, n. 4, p. 334-337, 1990. Disponível em: <http://www.aaccnet.org/publications/cc/backissues/1990/Documents/67_334.pdf>. Acesso em: 10 mar. 2013.

EUROLA, M. et al. **Results of the Finnish selenium program 2000-2001**. 2003. 45 p. (Agrifood Research Reports, v. 36). Disponível em: <<http://www.mtt.fi/met/pdf/met36.pdf>>. Acesso em: 10 mar. 2013.

FERREIRA, S. K. et al. Concentrações de selênio em alimentos consumidos no Brasil. **Revista Panamericana de Salud Pública**, Washington, v. 11, n. 3, Mar. 2002. Disponível em: <<http://www.scielosp.org/pdf/rpsp/v11n3/9395.pdf>>. Acesso em: 10 fev. 2013.

GOMEZ-GALERA, S. et al. Critical evaluation of strategies for mineral fortification of staple food crops. **Transgenic Research**, London, v. 19, n. 2, p. 165-180, Apr. 2010. Disponível em: <<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19685153>>. Acesso em: 10 mar. 2013.

HAUG, A. et al. How to use the world's scarce selenium resources efficiently to increase the selenium concentration in food. **Microbial Ecology in Health and Disease**: review article, Oslo, v. 19, n. 4, p. 209-228, Dec. 2007.

HAWKESFORD, M. J.; ZHAO, F. J. Strategies for increasing the selenium content of wheat. **Journal of Cereal Science**, London, v. 46, n. 3, p. 282-292, 2007. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0733521007000379>>. Acesso em: 10 jan. 2013.

HAWRYLAK, B.; SZYMAŃSKA, M. Selenium as a sulfhydrylic group inductor in plants. **Cellular & Molecular Biology Letters**, v. 9, n. 2, p. 329-336, 2004.

HIRSCHI, K. D. Nutrient biofortification of food crops. **Annual Review of Nutrition**, v. 29, p. 401-421, 2009. Disponível em: <<http://www.annualreviews.org/doi/pdf/10.1146/annurev-nutr-080508-141143>>. Acesso em: 10 jan. 2013.

KESKINEN, R. **Selenium fertilization**: plant uptake and residual in soil. 2012. 45 f. Dissertação (Doctoral Dissertation)-University of Helsinki, Helsinki, 2012.

LYONS, G. Selenium in cereals: improving the efficiency of agronomic biofortification in the UK. **Plant and Soil**, The Hague, v. 332, n. 1-2, p. 1-4, 2010.

POLONA, S. et al. Selenium uptake and species distribution in selenium-enriched bean (*Phaseolus vulgaris* L.) seeds obtained by two different cultivations. **European Food Research and Technology**, Berlin, v. 225, n. 2, p. 233-237, June 2007. Disponível em: <<http://www.springerlink.com/content/9g441722n7668263/>>. Acesso em: 10 fev. 2013.

RIOS, J. J. et al. Regulation of sulphur assimilation in lettuce plants in the presence of selenium. **Plant Growth Regulation**: an international journal on natural and synthetic regulators, Dordrecht, v. 56, n. 1, p. 43-51, May 2008.

RIOS, J. J. et al. Response of nitrogen metabolism in lettuce plants subjected to different doses and forms of selenium. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, London, v. 90, n. 11, p. 1914-1919, Aug. 2010. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/jsfa.4032/full>>. Acesso em: 10 fev. 2013.

SORS, T. G.; ELLIS, D. R.; SALT, D. E. Selenium uptake, translocation assimilation and metabolic fate in plants. **Photosynthesis Research**, Dordrecht, v. 86, n. 3, p. 373-389, Dec. 2005. Disponível em: <<http://link.springer.com/article/10.1007/s11120-005-5222-9>>. Acesso em: 10 jan. 2013.

SOUZA, M. P. et al. Rate-limiting steps in selenium assimilation and volatilization by Indian mustard. **Plant Physiology**, Washington, v. 117, n. 4, p. 1487-1494, 1998.

STROUD, J. L. et al. Soil factors affecting selenium concentration in wheat grain and the fate and speciation of Se fertilisers applied to soil. **Plant and Soil**, The Hague, v. 332, n. 1-2, p. 19-30, 2010 .

WHITE, P. J.; BROADLEY, M. R. Biofortification of crops with seven mineral elements often lacking in human diets - iron, zinc, copper, calcium, magnesium, selenium and iodine. **New Phytologist**, Cambridge, v. 182, n. 1, p. 49-84, 2009.

WILLIAMS, P. N. et al. Selenium characterization in the global rice supply chain. **Environmental Science & Technology**, Easton, v. 43, n. 15, p. 6024-6030, 2009.

YANG, F. M. et al. Effect of the application of selenium on selenium content of soybean and its products. **Biological Trace Element Research**, Clifton, v. 93, n. 1-3, p. 249-256, 2003.

ZAYED, A.; LYTLE, C. M.; TERRY, N. Accumulation and volatilization of different chemical species of selenium by plants. **Planta**, Berlin, v. 206, n. 2, p. 284-292, Mar. 1998. Disponível em: <<http://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s004250050402.pdf>>. Acesso em: 10 fev. 2013.

ZHANG, Y. et al. Uptake and transport of selenite and selenate by soybean seedlings of two genotypes. **Plant and Soil**, The Hague, v. 253, p. 437-443, 2003. Disponível em: <<http://www.springerlink.com/content/v5753212v24652q0/>>. Acesso em: 10 fev. 2013.

CAPÍTULO 2

**BIOFORTIFICAÇÃO AGRONÔMICA DA SOJA COM SELENATO DE
SÓDIO, DOSES E FORMAS DE APLICAÇÃO**

RESUMO

O objetivo desse trabalho foi definir para a cultura da soja a melhor dose e forma de aplicação de selênio usando como fonte o selenato de sódio (Na_2SeO_4) com o intuito de promover sua biofortificação, bem como avaliar a sua influência em caracteres agronômicos da cultura. O delineamento experimental utilizado foi o de blocos casualizados em esquema fatorial $2 \times 5 \times 3$, sendo os tratamentos duas cultivares de soja (EMBRAPA BRS Favorita RR e Pioneer P98Y11 RR), cinco doses de selênio (0; 10; 20; 30; 40 g ha^{-1}) e 3 formas de aplicação (foliar, solo e semente) sendo o experimento instalado em dois locais. As parcelas foram constituídas por quatro linhas, espaçadas de 50cm, com densidade de 15 plantas por metro linear, sendo utilizada como área útil as duas fileiras centrais. Avaliou-se os seguintes caracteres: altura de plantas e de inserção do primeiro legume, número de legumes por planta, número de grãos por legume, peso de 100 sementes, acamamento, rendimento de grãos e acúmulo de selênio nos grãos. Os tratamentos com aplicação foliar mostraram que a aplicação de selênio na forma de selenato de sódio aumenta o acúmulo nos grãos à medida que doses crescentes de Se foram aplicadas. Efeitos de interação genótipos e ambiente foram observados no processo de biofortificação agronômica, os quais deverão ser levados em consideração nas novas pesquisas. A biofortificação agronômica da soja com Se pode melhorar sua qualidade nutricional, contribuindo para incrementar a disponibilidade desse elemento nas dietas de animais e seres humanos. As doses de Se utilizadas alteraram significativamente o acúmulo de Se nos grãos. A altura de inserção do 1º legume, peso de 100 sementes e acúmulo de selênio foram alteradas significativamente em função das formas de aplicação do selênio.

Palavras-chave: Fitotoxidez. Selênio. Características agronômicas.

ABSTRACT

The aim of this study was to assess the best dose and form of selenium application using sodium selenate (Na_2SeO_4) as the source of that element in soybean plants and to evaluate its influence on agronomic characters of soybeans plants with the intent of promoting its biofortification. The experimental design was a randomized block in a 2x5x3 factorial scheme, installed at two locations. The treatments consisted of two soybean cultivars (EMBRAPA BRS Favorita RR and Pioneer P98Y11 RR), five doses of selenium (0; 10; 20; 30 and 40 g ha^{-1}) and three application methods (foliar, soil and seed). The plots were composed by four lines spaced by 50cm with a density of 15 plants per linear meter and the two central rows as the useful area. The following characters were evaluated: plant and first pod height, number of pods per plant, number of seeds per pod, 100 seed weight, lodging, grain yield and grain accumulation of selenium. Field experiments conducted with foliar application show that the application of selenium as sodium selenate has a positive effect regarding to the quality of the grain produced since increasing levels of Se were accumulated in those grains. Effects of genotype and environment interactions were observed in the process of agronomic biofortification which should be taken into consideration in further research. The agronomic soybean biofortification with selenium can improve its nutritional quality contributing to increase the availability of that element in the diets of animals and humans. The selenium accumulation in grains was altered by the doses used. The first pod height insertion, 100 seed weight and accumulation of selenium were significantly altered depending on the application forms of selenium.

Keywords: Phytotoxicity. Selenium. Agronomic characteristics.

1 INTRODUÇÃO

Uma das maneiras para garantir que os alimentos contenham selênio em sua composição pode ser através da biofortificação agronômica.

A biofortificação agronômica de uma cultura nada mais é do que a utilização de um determinado elemento ou nutriente através do uso de alguma forma de adubação individual ou com outro (s) nutriente (s), com o intuito de que o mesmo seja acumulado e possa estar disponível para o consumo humano ou animal.

Existem pesquisas diversas em diferentes países, inclusive no Brasil, que indicam e justificam a eficiência e segurança ambiental desse método de enriquecimento nutricional, utilizando para tal fim diversas culturas com diversos elementos alvos, dentre eles o selênio.

Nos processos de biofortificação com selênio, duas formas de liberação rápidas desse elemento têm sido usadas na maioria das pesquisas. O selenito de sódio e o selenato de sódio, apesar de existirem algumas outras.

Quando essas formas de liberação rápidas são usadas, o selenato de sódio tem-se apresentado como a melhor forma de aplicação desse elemento.

A utilização da cultura da soja nos processos de biofortificação se apresenta como uma das melhores maneiras de colocar o selênio nas rações e alimentos, já que essa cultura é a mais importante quando se pensa em proteínas de origem vegetal e grande conteúdo de óleo.

Assim, objetivou-se com a pesquisa definir a melhor dose e forma de aplicação de selênio, usando como fonte o selenato de sódio (Na_2SeO_4) com o intuito de promover a biofortificação da cultura de soja, bem como avaliar a sua influência em caracteres agronômicos dessa cultura.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Caracterização das áreas experimentais

Dois experimentos foram conduzidos em campos experimentais distintos da Universidade Federal de Lavras no Estado de Minas Gerais – Brasil. O primeiro, no Departamento de Agricultura da UFLA-Lavras, localizada a 21°14' de latitude sul, 45°00' de longitude oeste e altitude média de 918 m. O segundo no Centro de Desenvolvimento Científico e Tecnológico em Agropecuária da UFLA (CDCTA) da Universidade Federal de Lavras altitude de 954m, 21°12'11'' de latitude sul e 44°58'47'' de longitude oeste.

Segundo a classificação de Köppen, o clima do município de Lavras é do tipo Cwb, temperado úmido (com verão quente e inverno seco), caracterizado por uma precipitação média de 23,4 mm no mês mais seco e de 295,8 mm no mês mais chuvoso (ANTUNES, 1986). A temperatura média é de 19,3 °C no mês mais quente e de 15,8°C no mês mais frio, sendo a precipitação média anual de 1529,7 mm.

As análises de solo das áreas experimentais podem ser observadas na Tabela 1. Os solos utilizados foram classificados no Departamento de Agricultura e CDCTA como Latossolo Vermelho Escuro e Latossolo Vermelho Distroférico típico, respectivamente.

Tabela 1 Características químicas das amostras de solo da área experimental do Departamento de Agricultura da UFLA (A) Lavras, e do Centro de Desenvolvimento Científico e Tecnológico em Agropecuária da UFLA (CDCTA) (B) - MG, 2011.

A									
pH (H ₂ O)	P	K	Na	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	(t)
	mg/dm ³				cmol/dm ³			cmolc/dm ³	
5,2	6,9	117	-	2,1	0,3	0,2	7,9	2,7	2,9
(T)	V	m	MO	Prem	Zn	Fe	Mn	Cu	SSe
cmol/dm ³	%		dag/kg	mg/L			mg/dm ³ ppb		
10,6	55,9	6,8	3,4	12,9	2,6	34,2	13,9	3	35 ----
B									
pH (H ₂ O)	P	K	Na	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	(t)
	mg/dm ³				cmol/dm ³			cmolc/dm ³	
5,4	6,2	83	0,9	2,2	0,8	0,1	5,0	3,2	3,3
(T)	V	m	MO	Prem	Zn	Fe	Mn	Cuu	S Se
cmol/dm ³	%		dag/kg	mg/L			mg/dm ³ ppb		
8,3	58,9	3,0	3,0	17,6	2,9	51,5	5,0	1,9	80 51,4

Análises realizadas no Laboratório de Análise de Solo do Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

As características texturométricas das amostras do solo das áreas experimentais do Departamento de Agricultura da UFLA - Lavras, e do Centro de Desenvolvimento Científico e Tecnológico em Agropecuária da UFLA foram as seguintes: para a UFLA, o solo foi classificado como argiloso com a proporção de argila 60, silte 26 e areia 14 dag.kg⁻¹ de solo e, para o CDCTA, o solo foi classificado também como argiloso com a proporção de argila 52, silte 7 e areia 41 dag.kg⁻¹ de solo.

Uma análise adicional do conteúdo de selênio das áreas experimentais também foi realizada. Os resultados mostraram que para a área da UFLA o conteúdo de Se encontrava-se abaixo dos níveis de detecção dos aparelhos usados para tal fim, enquanto que para a área do CDCTA o nível de Se no solo foi de 51,4 ppb de Se.

2.2 Delineamento experimental e tratamentos avaliados

O delineamento experimental utilizado em cada experimento foi o de blocos aleatórios com três repetições, cujos tratamentos foram dispostos em uma estrutura fatorial 2x5x3, compreendendo duas cultivares (EMBRAPA BRS Favorita RR e Pioneer P98Y11 RR), cinco doses de selênio (0; 10; 20; 30;40 g.ha⁻¹) utilizando como fonte desse elemento o selenato de sódio (Na₂SeO₄) e 3 formas de aplicação (foliar, solo e semente).

Segundo a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, EMBRAPA (2013), a soja BRS Favorita RR é uma cultivar de crescimento determinado, com flor de coloração roxa, cor de pubescência marrom clara, cor de tegumento amarelo intermediário, cor de hilo preto e de ciclo curto, em torno de 118 dias para a maturação. Para a cultivar Pioneer P98Y11 RR Sementes, indica que essa cultivar apresenta crescimento determinado com a flor de coloração branca, cor da pubescência cinza, cor do tegumento amarelo intermediário, cor do hilo marrom e ciclo curto, em torno de 120 dias.

As parcelas experimentais foram constituídas de quatro linhas de 5,0 m de comprimento, espaçadas de 0,5 m entre si, sendo considerada como área útil as duas fileiras centrais e deixando como bordadura 50 cm nas extremidade das linhas úteis, totalizando 4m².

2.3 Instalação e condução dos experimentos

O preparo do solo para cada local foi composto de uma aração e uma gradagem. A abertura dos sulcos de semeadura foi realizado com tração mecanizada. Previamente, realizou-se a correção do pH do solo. A adubação foi realizada de acordo com Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, CFSEMG (1999), sendo aplicados 400 kg.ha^{-1} da fórmula N-P-K 2-30-16.

As sementes da soja foram inoculadas antes da semeadura com *Bradyrhizobium japonicum*, utilizando inoculante comercial na proporção de $1,2 \cdot 10^6$ bactérias por semente. A semeadura foi realizada aos 15 e 20 dias de novembro 2011, no Departamento de Agricultura da UFLA e CDCTA, respectivamente, a uma profundidade aproximada de 2 a 3 cm.

Após o desbaste de plantas manteve-se uma densidade de 15 plantas/m linear.

No controle de plantas daninhas foi utilizado o herbicida Glifosato em pós emergência, em uma única aplicação de 3 L.ha^{-1} . O controle mecânico através de capinas manuais foi feito quando necessário.

Para o controle de pragas e doenças, foram usados os inseticidas Beta-ciflutrina + Imidacloprido e Gama-Cialotrina e os fungicidas Azoxistrobina + Ciproconazol, de acordo com as necessidades e recomendações para a cultura.

As diferentes doses de selenato de sódio foram aplicadas da seguinte maneira: a aplicação de selênio via solo foi misturado ao adubo de plantio, em saco plástico hermeticamente fechado e distribuído nas linhas de plantio e posteriormente incorporado ao solo.

Na aplicação via semente, as doses de selênio foram adicionadas a uma solução de água filtrada e açucarada a 10%, resultando em concentrações de 0; 0,05; 0,1; 0,15; 0,2 gramas de selênio por litro, respectivamente. As sementes

(200g) foram colocadas em sacos plásticos sendo adicionados 5 ml da solução por saco de sementes que após mistura foram deixadas por 5 minutos na solução e posteriormente secadas ao sol. Logo após o tratamento, foram inoculadas com o *Bradyrhizobium japonicum* na dose já mencionada e semeadas nas parcelas experimentais.

A aplicação via foliar foi feita no início do enchimento dos grãos da soja estágio fenológico R5 (grãos na vagem com 3mm de comprimento num dos 4 últimos nós do caule, com folha completamente desenvolvida).

A aplicação do produto foi feita com um aspersor manual diluindo a dose por parcela em 0,2L (200L.ha⁻¹) de água filtrada e aplicada em toda a extensão da mesma.

2.4 Características avaliadas e análise estatística dos dados fenotípicos

As seguintes características foram avaliadas: altura de plantas (AltPlan), altura de inserção do primeiro legume (AltLeg), número de legumes por planta (NIPlan), número de sementes por legume (NsLeg), acamamento (Aca), peso de 100 sementes (Pcs), rendimento de grãos (Rend) e acúmulo de selênio nos grãos (ASe).

A altura da planta (cm), altura da inserção do primeiro legume (cm), número de legumes por planta, número de sementes por legume e peso de 100 sementes (g), foram determinados por ocasião da colheita em cada parcela tomando-se aleatoriamente cinco plantas das fileiras úteis. O grau de acamamento foi determinado em cada parcela segundo (BERNARD; CHAMBERLAIN; LAWRECE, 1965), atribuindo-se notas de 1 até 5, descritas como segue: Nota 1, todas as plantas da área útil eretas; nota 2, menos de 25% das plantas da área útil acamadas; nota 3, de 25 a 50% das plantas da área útil

acamadas; nota 4, de 50- 80% das plantas da área útil acamadas e nota 5, todas as plantas da área útil acamadas.

O rendimento foi determinado colhendo-se as plantas da área útil, que após trilhadas e beneficiadas tiveram seu peso corrigido à umidade de 13% e transformado em $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$.

Os teores de selênio nos grãos foram determinados através do método de Absorção Atômica com Geração de Hidretos e atomização em tubo de quartzo. O Espectrômetro de Absorção Atômica marca Varian (modelo SpectrAA 200) com o gerador de hidretos modelo VGA 77. As análises foram feitas no Laboratório de Análises Químicas LACHEM da Universidade Federal Santa Maria no Rio Grande do Sul. Considerando os limites instrumentais, a quantificação de selênio em grãos de soja na metodologia descrita foi da ordem de $30\mu\text{g}/\text{kg}$.

Após a análise de variância individual de cada experimento, foi realizado o teste da homogeneidade das variâncias residuais proposto por Pimentel-Gomes (2009), com a finalidade de verificar a possibilidade de realizar a análise conjunta dos mesmos. Segundo Pimentel-Gomes (2009), no caso de grupos de experimentos similares em que todos os tratamentos tenham o mesmo número de repetições, pode-se realizar a análise conjunta, se o quociente entre o maior e o menor quadrado médio residual for menor do que 7.

$$\frac{\text{QMR}(\text{maior})}{\text{QMR}(\text{menor})} < 7$$

Após a verificação da homogeneidade das variâncias residuais, foi realizada a análise conjunta usando o teste F para análise de variância.

Foi determinada a acurácia como parâmetro de qualidade das análises realizadas, já que a mesma leva em consideração os efeitos aleatórios e sistemáticos enquanto a precisão leva em consideração apenas os erros

sistemáticos. De acordo com Resende (2002), a acurácia varia de 0 a 100, sendo classificada como: acurácia muito alta ($r_{gg} \geq 90$), alta ($70 \leq r_{gg} < 90$), moderada ($50 \leq r_{gg} < 70$), baixa ($r_{gg} < 50$). O cálculo da acurácia foi realizado a partir do uso do estimador:

$$r_{gg} = \sqrt{1 - \frac{1}{F_c}} \times 100.$$

Em que:

r_{gg} é a acurácia e o F_c (Snedecor) é o valor da razão de variâncias para os efeitos de tratamentos, associada à análise de variância (RESENDE; DUARTE, 2007).

Os efeitos dos tratamentos quando significativos foram submetidos à análise de regressão e ao contraste de médias. Os dados foram analisados com o programa Sisvar® e as médias comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade (FERREIRA, 2011).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O resumo da análise de variância com os quadrados médios e as respectivas significâncias das características estudadas, altura de plantas (AltPlan), altura de inserção do primeiro legume (AltLeg), número de legumes por planta (NIPlan), número de sementes por legume (NsLeg), acamamento (Aca), peso de 100 sementes (Pcs), rendimento de grãos (Rend) e acúmulo de selênio nos grãos (ASe) é mostrado na Tabela 2.

Tabela 2 Resumo da análise de variância conjunta dos dados relativos à altura de plantas (AltPlan), altura de inserção do primeiro legume (AltLeg), número de legumes por planta (NIPlan), número de sementes por legume (NsLeg), acamamento (Aca), peso de 100 sementes (Pcs), rendimento de grãos (Rend), acúmulo de selênio nos grãos (ASe), obtidos nos experimentos de biofortificação agrônômica da soja, Lavras – MG 2013.

Fontes	de	GL	AltPlan	AltLeg	NIPlan	Nsleg	Aca	Pcs	Rend	ASe
Locais (L)		1	133,30	389,37**	5,02*	0,0414**	0,561**	30,91**	4301222,51**	0,0470
Blocos (local)		4	1332,93**	304,76**	2,28	0,0059	0,257**	5,25**	1384353,20**	11,8169**
(Tratamentos)		(29	(781,53)	(50,55)	(12,45)	(0,0661)	(1,573)	(89,57)	(3313920,90)	(88,0728)
Cultivares (C)		1	431,52**	1,82	9,06**	0,0425**	1,362**	83,32**	1671019,25**	0,5611
Formas	de	2	88,05	26,95*	0,76	0,0029	0,055	2,62**	657148,32	64,7273**
Doses (D)		4	50,04	2,16	0,17	0,0005	0,048	0,30	376829,53	11,3089**
C x F		2	24,39	0,62	0,61	0,0005	0,034	1,59*	165011,30	0,3598
C X D		4	81,35	6,63	0,16	0,0060	0,022	0,82	199407,53	0,3307
F X D		8	86,49*	5,96	1,12	0,0067	0,025	0,53	154809,70	10,3003**
C x D x F		8	19,69	6,41	0,57	0,0070	0,027	0,39	89695,27	0,4847
(Tratamentos	x	(29	(666,41)	(88,91)	(14,86)	(0,0315)	(2,009)	(3,15)	(2752808,57)	(3,5760)
CxL		1	411,32**	40,61*	8,34**	0,0193*	1,829**	0,02	1251001,86*	2,1364
FxL		2	32,64	2,72	0,27	0,0004	0,023	0,35	44456,09	0,0147
DxL		4	49,78	9,63	1,03	0,0003	0,046	0,75	266067,54	0,0463
CxFxL		2	83,55	2,89	2,54	0,0057	0,024	0,11	48683,58	0,2657
CxDxL		4	24,33	9,43	1,01	0,0017	0,022	0,35	642557,52*	0,3699
FxDxL		8	23,43	10,32	0,87	0,0009	0,022	0,83*	313676,11	0,4022
CxFxDxL		8	41,36	13,31	0,80	0,0032	0,043	0,38	186365,87	0,3408
RESÍDUO		116	38,64	8,36	1,11	0,0039	0,049	0,36	239825,74	1,3999
r _{gg} %			97,50	91,35	95,44	97,00	98,43	99,79	96,31	99,20

*e**Significativos a 5 e 1% pelo teste de F respectivamente

As acurácias das análises observadas em cada uma das variáveis estudadas foram muito altas (Tabela 2).

Mikhail e Ackermann (1976 citados por MONICO et al., 2009), apresentam a acurácia como sendo o grau de proximidade de uma estimativa com seu parâmetro (ou valor verdadeiro), enquanto a precisão expressa o grau de consistência da grandeza medida com sua média. Esses autores acrescentam que acurácia reflete a proximidade de uma grandeza estatística ao valor do parâmetro para o qual ela foi estimada e que precisão está diretamente ligada com a dispersão da distribuição das observações.

Assim também, Resende e Duarte (2007) propuseram o uso da acurácia seletiva (AS) em detrimento do coeficiente de variação (CV), devido a sua propriedade de informar sobre a eficácia da inferência acerca do valor genotípico da cultivar, possibilitando que os experimentos de valor de cultivo e uso (VCU) sejam abordados do ponto de vista genético e estatístico e não somente sob a perspectiva estatística.

3.1 Altura da planta (Alt Plan)

Na cultura da soja, o rendimento de grãos, controle de plantas daninhas, perdas durante a colheita mecanizada e acamamento estão relacionadas diretamente à altura das plantas, sendo fundamental na indicação das cultivares para uma determinada região. Fatores muito diversos como os ambientais e genéticos podem modificar essa característica. No presente trabalho, a altura das plantas apresentou diferenças significativas entre cultivares. Essa característica apresentou em média 81,5 cm de altura com variações médias de 71,3 a 87,2 cm para a cultivar BRS Favorita RR e uma média de 84,6 cm e com variações médias de 76,1 a 95,1cm para a cultivar Pioneer P98Y11 RR, existindo assim

uma diferença de 3,54% de altura em média entre as cultivares em favor da cultivar Pioneer P98Y11 RR (Tabela 3).

Tabela 3 Resultados médios da altura de plantas em centímetros de duas cultivares de soja cv. BRS Favorita RR e cv. Pioneer P98Y11 RR obtidos no experimento biofortificação agrônômica da soja, Lavras – MG - 2013.

DOSES	BRS Favorita RR				Pioneer P98Y11 RR				
	FOL	SOL	SEM	Médias	FOL	SOL	SEM	Médias	
UFLA									
0	82,2	81,7	76,4	80,1	78,5	89,6	86,0	84,7	
10	87,2	75,6	83,1	82,0	95,1	85,5	84,8	88,4	
20	82,2	82,3	83,9	82,8	88,9	91,2	81,1	87,1	
30	84,0	80,5	83,4	82,7	88,0	89,1	80,1	85,7	
40	80,4	78,7	71,3	76,8	91,2	89,3	86,9	89,2	
Médias	83,2	79,8	79,6	80,9B	88,3	88,9	83,8	87,0A	
CDCTA									
0	81,1	85,2	86,8	84,4	80,1	81,1	86,9	82,7	
10	87,1	80,3	78,7	82,0	77,5	76,1	84,4	79,3	
20	85,5	86,5	84,5	85,5	86,1	81,4	85,1	84,2	
30	86,1	80,8	75,6	80,8	81,9	83,0	81,6	82,2	
40	78,1	81,8	74,1	78,0	83,1	85,5	79,5	82,7	
Médias	83,6	82,9	79,9	82,1A	81,7	81,4	83,5	82,2A	
Média Geral			81,5B				84,6A		

UFLA 83,9A

CDCTA 82,1A

Médias seguidas da mesma letra maiúscula não diferem entre si pelo teste Tukey no nível de 5%

A altura da planta apresentou variação significativa de acordo com a cultivar para cada local usado nos experimentos. Na UFLA, houve diferenças significativas entre as cultivares estudadas, sendo que para a cultivar BRS Favorita RR a altura média das plantas foi de 80,9cm, enquanto que para a cultivar da Pioneer P98Y11 RR foi de 87cm (7,04% mais alta). Já no CDCTA não foram observadas diferenças significativas na altura das plantas das duas cultivares estudadas (Tabela 3).

Houve interação significativa entre formas (F) x doses (D) para a altura das plantas (Tabela 3). Segundo indicam Hurd- Karrer (1937; Bellet al. (1992); Blaylock e James (1994); Dhillon e Dhillon (2003) citados por Sors et al. (2005), a taxa e forma de absorção de Se, depende da concentração e forma química do selênio nas soluções do solo, das condições de pH e da presença de sulfatos e fosfatos, os quais competem com esse elemento. Além disso, sabe-se que o transporte do Se e do S são mediados por transportadores de sulfato para dentro da planta. De acordo com uma revisão feita por Leustek (2002 citado por SORS; ELLIS; SALT (2005), a absorção do sulfato do solo ocorre através do uso de transportadores de alta e baixa afinidade que estão localizados nas células corticais e epidérmicas da raiz. Os transportadores de sulfato com alta afinidade com K_m aproximado de 9 μM são expressos exclusivamente nas raízes e acredita-se que seja o principal transportador do enxofre, Smith et al. (1997); Shibagaki et al. (2002) citados por Sors, Ellis e Salt (2005). Por outro lado, os transportadores de baixa afinidade que são expressos nas folhas e raízes possuem um K_m para o sulfato de aproximadamente 100 μM , acredita-se que estejam envolvidos tanto na absorção do S da solução do solo para as raízes, assim como de maneira intracelular do apoplasto para o simplasto. Após análise dos experimentos de Hirai et al. (2003); Maruyama-Nakashita et al. (2003); Shibagaki et al. (2002), citados por Sors, Ellis e Salt (2005), concluíram que existe então alta evidência de que o selenato seja absorvido pelas plantas através de transportadores de S com alta afinidade. Isso explica porquê da forma de aplicação (locais diferentes da planta) e as concentrações do selênio modificaram a altura das plantas (Figura 1).

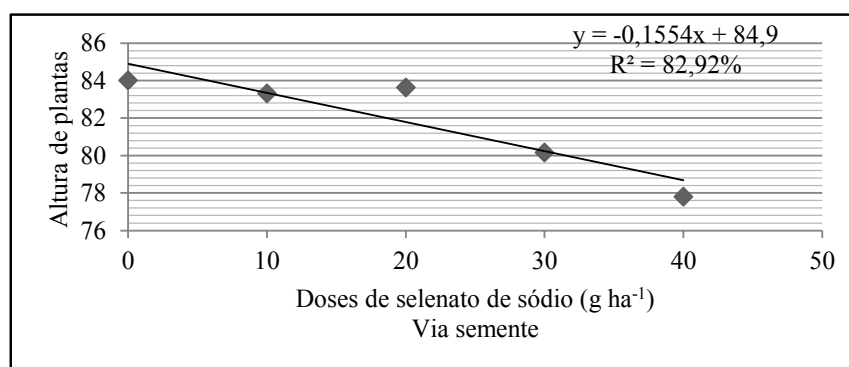


Figura 1 Variação da altura de plantas (cm) em função da aplicação de diferentes doses selenato de sódio via sementes, obtidos no experimento biofortificação agrônômica da soja, Lavras – MG - 2013.

A diminuição do tamanho das plantas à medida que se aumentou as doses de Se aplicado via semente pode ter sido devido à toxidez causada por uma absorção mais intensa de Se, não existindo uma competição inicial com enxofre na hora da assimilação e incorporação do selênio nas proteínas.

Na fase inicial, uma quantidade menor de Se foi absorvida com doses menores de selenato aplicado. A quantidade de Se que foi absorvido e integrado nos selenoaminoácidos, selenocisteína e selenio metionina e integrados nas proteínas pode ter sido maior com aplicação de doses menores. À medida que as doses foram aumentadas, houve uma diminuição da incorporação desses selenoaminoácidos em proteínas específicas promovendo assim a fitotoxidez. O maior contribuinte da toxidez de selênio nas plantas é causado pela não incorporação desse elemento nas proteínas apresentado por Brown e Shrift (1981 citados por SORS; ELLIS; SALT, 2005).

O processo mediante o qual as plantas acumuladoras de selênio não apresentaram fitotoxidez com o acúmulo desse elemento é através da incorporação do mesmo em aminoácidos não protéicos como Se-metilseleniocisteína, α -glutamil-Se-metilseleniocisteína, e a selenocistationina

nos estudos de Dunnill e Fowden (1967); Brown e Shrift, (1981) e Burnell (1981) citados por Sors, Ellis e Salt (2005).

3.2 Altura do primeiro legume (Alt Leg)

Na cultura da soja, onde se espera o mínimo possível de perdas na colheita mecânica, existe uma necessidade de que valores mínimos de inserção da primeira vagem sejam próximos a 12 cm para facilitar a colheita e, conseqüentemente, aumente o lucro dos produtores.

Na Tabela 2, pode-se observar que para essa característica houve efeito significativo para local, forma de aplicação e interação das cultivares x locais. No caso dos experimentos realizados nos dois locais, verificou-se que as médias apresentaram variação de 23,7 a 25,05 ambas acima do mínimo desejado. Dependendo do local do experimento houve diferenças nessa característica. Para a área experimental CDCTA, a média geral das plantas (23,03 cm) foi inferior à obtida na UFLA (25,9 cm), apresentando uma diferença de 12,46% entre os locais. (Tabela 4).

Tabela 4 Resultados médios da altura da inserção do primeiro legume (cm) de duas cultivares de soja cv. BRS Favorita RR e cv. Pioneer P98Y11 RR obtidos no experimento biofortificação agrônômica da soja, Lavras – MG - 2013.

FORMAS APLICAÇÃO	BRS Favorita RR		Pioneer P98Y11 RR		MÉDIA
	UFLA	CDCTA	UFLA	CDCTA	
FOL	26,4	24,0	27,0	22,8	25,05A
SOL	25,5	23,8	26,5	22,1	24,48AB
SEM	24,7	22,7	25,2	22,2	23,7B
MÉDIAS	25,5a	23,7b	26,3a	22,4b	
UFLA	25,9A				
CDCTA	23,03B				

Médias seguidas da mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha não diferem entre si pelo teste Tukey no nível de probabilidade 5%.

A altura média da inserção do primeiro legume também teve uma variação significativa nas cultivares utilizadas em cada um dos locais usados para os experimentos (Tabela 4). A cultivar BRS Favorita RR apresentou média de 25,5 cm de altura do primeiro legume na UFLA e 23,7 cm no CDCTA, com uma diferença média de 7,6% entre as localidades. Já para a cultivar Pioneer P98Y11 RR, observou-se que na UFLA a média foi de 26,3 cm e, no CDCTA, de 22,4 cm, 17,41% de diferença na mesma cultivar. A altura de inserção do primeiro legume é uma característica que pode facilmente ser afetada pela interação genótipo com o ambiente, explicando as variações descritas aqui.

Outra fonte de variação significativa para modificar a altura de inserção do primeiro legume foi a forma de aplicação do selenato na cultura. Observando a tabela 4, verifica-se que a aplicação desse elemento na semente promoveu uma altura do primeiro legume menor (23,7 cm) quando comparado à aplicação via foliar (25,05 cm). Como mencionado para a altura das plantas, o efeito fitotóxico do selenato na planta quando aplicado via semente pode ser verificado também para essa característica. Quando se verifica a aplicação via solo, observa-se que não houve diferenças significativas de altura do primeiro legume em relação à aplicação via foliar.

3.3 Número de legumes por planta (NI Plan), número de sementes por legume (Ns leg) e Acamamento (Aca)

Dentre os componentes da produção da cultura da soja, o número de legumes por planta e o número de grãos por legume são considerados muito importantes, já que correlacionam-se diretamente com a produtividade da cultura.

Assim como para esses componentes, o acamamento também é uma característica muito influenciada pelos fatores ambientais. Na Tabela 2, pode-se

observar que para essas três características houve efeito significativo para cultivares assim como na interação das cultivares com os locais.

Para o acamamento, o tipo de solo, umidade, fertilidade, ventos e a genética das plantas são alguns dos fatores que podem influenciar diretamente nessa característica. Solos com textura argilosa, mais úmidos e mais férteis geralmente possuem níveis de acamamento superiores a outros tipos de solos. Da mesma maneira que a altura da planta e a inserção do primeiro legume, essa característica tem um efeito muito importante na colheita da soja. A medida que o acamamento se manifesta em maiores intensidades, as perdas na colheita são incrementadas diretamente pela dificuldade em se recolher as plantas acamadas.

Nos experimentos, o maior índice de acamamento médio foi observado na UFLA (1,6) e o menor no CDCTA (1,3). Na área experimental CDCTA, o acamamento para as cultivares BRS Favorita RRe Pioneer P98Y11 RR apresentaram o mesmo valor (1,3), enquanto que para o local UFLA, verificou-se um acamamento significativamente diferente de 1,1 para a cultivar BRS Favorita RRe 2,1 para a cultivar Pioneer P98Y11 RR.

Pode-se observar também que o índice geral de acamamento para a cultivar Pioneer P98Y11 RR foi em média significativamente maior (1,7) quando comparado à cultivar BRS Favorita RR (1,2). Pode-se verificar a interação do genótipo com o ambiente para essa característica com as cultivares e os locais onde foram realizados os experimentos. Não foram observados efeitos significativos de doses ou formas de aplicação para essa característica (Tabela 5).

Tabela 5 Resultados médios do acamamento de plantas duas cultivares de soja (cv. BRS Favorita RR e cv. Pioneer P98Y11 RR) dentro de cada dose e cada forma de aplicação de Se, do experimento biofortificação agrônômica da soja, Lavras – MG - 2013.

UFLA	BRS Favorita RR				Pioneer P98Y11 RR			
DOSES	FOL	SOL	SEM	Médias	FOL	SOL	SEM	Médias
0	1,3	1,0	1,0	1,1	2,0	1,0	2,0	1,7
10	1,3	1,0	1,3	1,2	2,3	2,3	2,3	2,3
20	1,3	1,0	1,3	1,2	1,7	2,3	2,7	2,2
30	1,0	1,0	1,3	1,1	2,3	2,0	3,0	2,4
40	1,0	1,0	1,3	1,1	2,0	1,7	2,0	1,9
Médias	1,2	1,0	1,2	1,1b	2,1	1,9	2,4	2,1a
CDCTA								
0	1,3	1,3	1,7	1,4	1,3	1,3	1,3	1,3
10	1,3	1,3	1,7	1,4	1,3	1,3	1,7	1,4
20	1,0	1,3	1,0	1,1	1,3	1,0	1,0	1,1
30	1,3	1,7	1,3	1,4	1,3	1,0	1,0	1,1
40	1,3	1,3	1,0	1,2	1,3	1,0	1,7	1,3
Médias	1,3	1,4	1,3	1,3a	1,3	1,1	1,3	1,3a
Geral				1,2b				1,7a
Média geral	UFLA	1,6A						
	CDCTA	1,3B						

Médias seguidas da mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha não diferem entre si pelo teste Tukey no nível de 5%

Para a característica número de legumes por planta (NIPlan), a média superior foi obtida na área experimental UFLA 54,75 se comparado a 49,15 legumes por planta e para a área experimental CDCTA. Quando se verificou as cultivares de maneira individual, pode-se observar que a média geral de legumes por planta da cultivar Pioneer P98y11 (55,7) foi significativamente superior à obtida com a BRS Favorita RR (48,2).

Na interação cultivares x locais pode se verificar que no local UFLA, não ocorreram diferenças significativas para a característica estudada, mostrando médias gerais de 53,3 legumes por planta para a cultivar BRS Favorita RR e de 56,2 para a cultivar Pioneer P98y11. Para o local CDCTA, entretanto, ocorreram diferenças significativas para essa característica, quando se observa as cultivares

utilizadas. Nesse local, a cultivar BRS Favorita RR foi estatisticamente inferior (43,1 legumes por planta em média) quando comparada com a cultivar Pioneer P98y11 (55,2) (Tabela 6).

Tabela 6 Resultados médios de número de legumes por planta de duas cultivares de soja (cv. BRS Favorita RR e cv. Pioneer P98Y11 RR) dentro de cada dose e cada forma de aplicação de Se, do experimento biofortificação agrônômica da soja, Lavras – MG - 2013.

DOSES	BRS Favorita RR				Pioneer P98Y11 RR			
	FOL	SOL	SEM	Médias	FOL	SOL	SEM	Médias
UFLA								
0	51,4	52,2	52,1	51,9	64,3	64,6	52,9	60,6
10	49,1	57,5	53,8	53,5	49,8	63,9	45,3	53,0
20	56,4	41,6	55,0	51,0	56,5	53,7	57,5	55,9
30	66,3	52,3	49,1	55,9	47,3	48,0	60,3	51,9
40	58,1	58,1	46,7	54,3	54,4	55,9	67,8	59,4
Médias	56,3	52,3	51,3	53,3a	54,5	57,2	56,8	56,2a
CDCTA								
0	36,2	49,9	35,9	40,7	61,2	60,7	60,4	60,8
10	46,8	42,3	49,2	46,1	47,6	55,4	60,5	54,5
20	42,6	48,1	47,2	46,0	59,9	55,7	54,5	56,7
30	37,6	43,6	40,8	40,7	64,0	45,8	57,6	55,8
40	36,2	36,5	53,2	42,0	45,5	40,7	58,1	48,1
Médias	39,9	44,1	45,3	43,1b	55,7	51,7	58,2	55,2a
Geral				48,2b				55,7a
UFLA	54,75A							
CDCTA	49,15B							

Médias seguidas da mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha não diferem entre si pelo teste Tukey no nível de 5%

Além das interações dos efeitos ambientais e genéticos, o maior número de legumes obtidos nos tratamentos pode ser devido ao maior número de locais para formação de estruturas reprodutivas devido a maiores alturas de plantas nesses locais, resultando em maior número de legumes.

Nos processos de seleção e recomendação de genótipos, em programas de melhoramento de plantas, são frequentemente realizadas avaliações do desempenho dos genótipos em diferentes locais, anos e épocas de semeadura.

Nessas condições, normalmente o desempenho relativo dos genótipos quase sempre varia de um ambiente para outro em consequência da interação genótipo x ambiente Allard (1961); Eberhart e Russell (1966); Cruz e Regazzi (1993) citados por Pires et al. (2012).

O componente da produção número de sementes por legume também apresentou efeito significativo dos tratamentos como mencionado anteriormente (Tabela 2). A média geral de grãos por legume para a área experimental UFLA foi significativamente maior (2,14) do que na área CDCTA (2,05). Ao mesmo tempo, a cultivar BRS Favorita RR apresentou uma média geral de grãos por legume significativamente superior do que a cultivar Pioneer P98Y11 RR, de 2,14 e 2,05 grãos por legume, respectivamente. Verificando a interação das cultivares com os locais estudados, observa-se que as cultivares não apresentaram diferenças significativas na área experimental UFLA, mostrando médias de 2,16 grãos por legume para a cultivar BRS Favorita RR e, para cultivar Pioneer P98Y11 RR, a média foi de 2,13. No local CDCTA, contudo, a cultivar BRS Favorita RR apresentou uma média maior (2,13) do que a cultivar Pioneer P98Y11 RR (1,98) (Tabela 7).

Tabela 7 Resultados médios de número de grãos por legumes de duas cultivares de soja cv. BRS Favorita RR e cv. Pioneer P98Y11 RR obtidos no experimento biofortificação agronômica da soja, Lavras – MG - 2013.

DOSES	BRS Favorita RR				Pioneer P98Y11 RR				
	FOL	SOL	SEM	Médias	FOL	SOL	SEM	Médias	
UFLA									
0	2,04	2,40	2,14	2,19	2,28	2,07	2,06	2,13	
10	2,35	2,31	2,03	2,23	2,11	2,15	1,98	2,08	
20	2,12	1,96	2,16	2,08	2,20	2,19	2,14	2,18	
30	2,13	2,10	2,06	2,10	2,08	2,16	2,26	2,17	
40	1,94	2,28	2,35	2,19	2,10	2,11	2,00	2,07	
Médias	2,0	2,21	2,15	2,16a	2,15	2,13	2,09	2,13a	
CDCTA									
0	2,18	2,10	2,13	2,14	2,00	2,00	1,97	1,99	
10	2,20	2,16	1,99	2,12	1,96	2,05	1,92	1,98	
20	2,21	1,94	2,13	2,09	1,96	1,98	2,03	1,99	
30	2,12	2,03	2,14	2,10	1,89	2,13	1,95	1,99	
40	2,09	2,31	2,16	2,19	1,96	1,94	1,93	1,94	
Médias	2,16	2,11	2,11	2,13a	1,95	2,02	1,96	1,98b	
Geral					2,14a				
UFLA 2,14A									
CDCTA 2,05B									

Médias seguidas da mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha não diferem entre si pelo teste Tukey no nível de 5%.

Como mencionado anteriormente e verificando os resultados analisados para outras características, pode-se mencionar que a interação genótipo ambiente nesse experimento teve um papel importante nos resultados obtidos.

A cultura da soja apresenta uma característica de grande plasticidade, isto é, modifica suas características morfológicas facilmente de acordo com as condições ambientais tais como o espaçamento, luminosidade, fertilidade entre outros (HEIFFIG, 2002).

3.4 Peso de 100 sementes (Pcs)

O peso médio de 100 sementes pode apresentar variações em diferentes locais e épocas de semeadura de forma natural. Segundo Ramalho et al. (2012), a interação genótipo ambiente é decorrente da variação do desempenho particular de cada genótipo nos vários ambientes, isto é, reflete as diferentes sensibilidades dos genótipos às mudanças do ambiente.

Levando isso em consideração, verificou-se que para a variável Pcs, as duas cultivares estudadas apresentaram médias significativamente diferentes, sendo superior para a cultivar BRS Favorita RR (16,74g) quando comparada com a cultivar Pioneer P98Y11 RR (14,77g). Do mesmo modo, houve diferenças significativas para locais. No CDCTA, o peso médio de cem sementes (Pcs) foi de 16,15g, enquanto que para a UFLA, o Pcs foi de 15,36g (Tabela 8).

Tabela 8 Resultados médios do peso de 100 sementes em g de duas cultivares de soja cv. BRS Favorita RR e cv. Pioneer P98Y11 RR obtidos no experimento biofortificação agrônômica da soja, Lavras – MG - 2013.

	BRS Favorita RR			Pioneer P98Y11 RR			Média Geral
	UFLA	VIT	Média	UFLA	VIT	Média	
FOL	16,62 ₁₅	17,48	17,05aA	14,50	15,22	14,86bA	15,96A ₆₀
SOL	16,23	16,84	16,54aB	14,49	15,28	14,89bA	15,72AB
SEM	16,17	17,12	16,65aB	14,17	14,95	14,56bB	15,60B
Média	16,34 ₄₅	17,15	16,74a ₉₀	14,38	15,15	14,77b ₉₀	
UFLA	15,36 B ₉₀						
CDCTA	16,15 A						

Médias seguidas da mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha não diferem entre si pelo teste Tukey no nível de 5%

As formas de aplicação de selênio também mostraram influência no Pcs. Em ordem de eficiência, a aplicação do selenato de sódio via foliar apresentou efeito maior no incremento no Pcs do que na forma de aplicação de embebição das sementes com o selenato. O Pcs para o primeiro foi de 15,96 g enquanto que

para a embebição de sementes foi de 15,60 g. No caso do tratamento via solo, teve um efeito similar (15,72g) aos dois tratamentos mencionados anteriormente (Tabela 8).

Para entender melhor esses efeitos, o estudo da interação significativa formas de aplicação x cultivares indicou que para a cultivar BRS Favorita RR o Pcs médio para a aplicação via foliar (17,05g) foi significativamente maior que as outras duas formas de aplicação, sendo de 16,54 g para a aplicação via solo e de 16,65 g para a aplicação via semente. Já para a cultivar Pioneer P98Y11 RR, tanto a aplicação via foliar (14,86 g) quanto a aplicação via solo (14,89 g) apresentaramo mesmo efeito, porém superior com a aplicação via semente (14,56 g).

Kang (1988 citado por Ramalho et al., 2012), indica que a natureza da interação genótipo ambiente deve ser atribuída a fatores fisiológicos e bioquímicos próprios de cada cultivar. Em termos genéticos, a interação ocorre quando a contribuição dos genes que controlam o caráter ou o nível de expressão dos mesmos difere entre os ambientes. Isso ocorre porque a expressão dos genes é influenciada e/ou regulada pelo ambiente.

Com isso a capacidade de cada cultivar de assimilar o selênio de maneira diferenciada está ligada diretamente com a sua constituição genética, que faz com que o PCS tenha sido um pouco diferente para essas duas cultivares quando analisada a forma de aplicação utilizada. Os processos fisiológicos e bioquímicos ocorrendo de maneira diferenciada nas cultivares estudadas permitiram que a diferença do PCS nos tratamentos foliar e semente acontecessem. O indício dessa diferença é o efeito fitotóxico ocasionado nas sementes, que pode ter ocorrido devido aos tipos de transportadores nas sementes e nas folhas atuaram de maneira diferenciada, como descrito anteriormente.

O efeito observado quando aplicado o Se via semente também pode ser devido a menor proporção de massa verde presente na semente quando

comparado com a massa verde da planta na hora de aplicação do Se via foliar. A quantidade desse elemento assimilado pela planta quando foi feita a aplicação via foliar foi muito superior do que aquela encontrada quando aplicado via semente, o que indica que a incorporação do Se aplicado à planta, quando já se encontrava bem desenvolvida, permitiu que o efeito fitotóxico não se manifestasse. Além disso, o selênio disponibilizado nas concentrações aplicados via foliar para a cultivar BRS Favorita RR teve a capacidade de aumentar a atividade antioxidante na planta, o que permitiu uma maior atuação desse elemento e menor degradação dos componentes celulares.

Quando se verifica o comportamento da aplicação de Se ao solo no Pcs, a solução do solo, as condições de pH e, principalmente, a presença de sulfatos e fosfatos em concentrações diferentes nos dois locais (Tabela 1) podem ter competido com a absorção do selênio, quando aplicados via solo e semente, o que não ocorreu quando esse elemento foi aplicado via foliar, afetando assim os processos mencionados.

Os transportadores de alta e baixa afinidade de S presentes nas raízes das duas cultivares podem ter sido ativados de maneira diferenciada nos locais estudados, concorrendo e competindo também de maneira diferenciada pela absorção de Se. Efeitos antioxidantes em diferentes experimentos foram também verificados.

Ramos et al. (2011a), trabalhando com alface, verificaram que baixas concentrações de selênio promoveram a maior produção de biomassa devido a efeitos antioxidante promovido por esse elemento. As plantas quando pulverizadas com selenato de sódio conseguem incorporar o selênio nas suas reações fisiológicas para este atuar como agente antioxidante. Esse processo ocorre como em muitas outras plantas através da associação do aumento da atividade enzimática da superóxido dismutase e da glutathionperoxidase (DJANAGUIRAMAN et al., 2005).

Finalmente, analisando o desdobramento da interação níveis e formas de aplicação para cada local, observou-se que houve diferenças significativas para os níveis de selênio aplicados via foliar tanto para a localidade UFLA quanto para a localidade CDCTA, e também quanto aos níveis aplicados via solo para a localidade UFLA. Nos três casos, equações de regressão quadráticas foram ajustadas aos resultados encontrados (Figura 2).

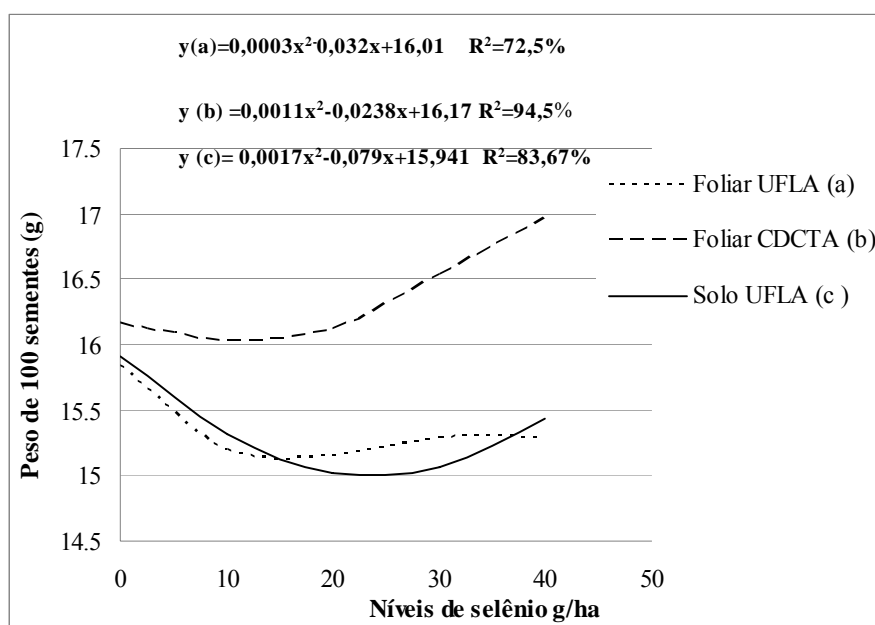


Figura 2 Variação do peso de 100 sementes (em gramas) de soja em função da aplicação de diferentes doses selenato de sódio, dentro da forma de aplicação desse elemento em dois locais diferentes.

Na Figura 2, pode-se observar que na localidade UFLA, a forma de aplicação foliar, houve redução do Pcs com a aplicação de selênio. Na dose de 0 g de selênio, o Pcs foi de 15,83 g, enquanto na dose 20 g de selênio, o Pcs foi de 15,29 g. Esse Pcs se manteve até a dose de 40g de Se.

Na aplicação de Se via solo, até 20 g de Se promoveu uma diminuição do Pcs de 15,91 para 15,02 gramas. A partir dessa dose, o Pcs aumentou até o peso de 15,44 g quando foi aplicada a dose de 40 g.

O efeito da aplicação de Se não deve ser relacionado com o incremento direto na produtividade das plantas, mas sim com os efeitos positivos ou negativos que esse elemento possa provocar.

O selênio deve ser relacionado com processos pró ou antioxidantes nas plantas, o que faria com que pequenas variações de incremento em produtividade ocorram ou diminuições da mesma se manifestem devido a efeitos fitotóxicos e/ou pró-oxidativos (aumentando a concentração de H_2O_2 ou induzindo peroxidação lipídica) (RIOS et al., 2008).

Isto pode explicar as variações que foram verificadas na localidade UFLA, onde um efeito fitotóxico e/ou pró-oxidativo foi o responsável pela diminuição do Pcs.

Por outro lado, um processo antioxidante possivelmente ocorreu para a forma de aplicação foliar para a localidade do CDCTA. Como foi mencionado acima, muitos são os fatores que podem estar relacionados diretamente ao tipo de aplicação e a quantidade absorvida pelas plantas. Segundo Seppanen et al. (2003); Xue et al. (2001) citados por Sors, Ellis e Salt (2005), os efeitos antioxidantes nas plantas na presença de selênio são devidos em grande parte a elevados níveis de transcrição de glutathione peroxidase e superoxidismutase, enzimas que catalizam a redução de peróxidos orgânicos e peróxido de hidrogênio, as quais protegem as células de danos causados por espécies reativas ao oxigênio.

Assim, para a forma de aplicação foliar na área do CDCTA, as doses de Se aplicadas tiveram efeito um pouco diferente dos observados na UFLA. Para a

forma de aplicação foliar, a dose de 10g de Se promoveu uma diminuição inicial do Pcs que foi de 16,17g da testemunha para 16,03g com a dose de 10g de Se. A partir da dose de 20g de Se houve um aumento do Pcs, chegando a 16,96g na dose de 40g de Se (Figura 2).

A quantidade de enxofre presente no solo da área experimental da UFLA apresentou proporções inferiores ($35\text{mg}/\text{dm}^3$) àsquelas presentes na área do CDCTA ($80\text{ mg}/\text{dm}^3$). Assim, a concorrência menor entre o S e o Se na primeira área pode ter permitido uma maior absorção de Se na localidade UFLA, ocasionando o processo fitotóxico. A maior competição pelos sítios de absorção entre o S e o Se na área da CDCTA pode ter ocasionado uma absorção de selênio muito menor, promovendo o efeito antioxidante já mencionado.

3.5 Rendimentode grãos (Rend)

Como na maioria das características estudadas nesse trabalho, houve efeito significativo para a interação genótipos x ambiente para o rendimento de grãos. Na Tabela 2, podemos observar efeito significativo para locais (L), cultivares (C) e interação (CxL) nos experimentos realizados.

Verificando a Tabela 9 para a localidade experimental UFLA, pode-se observar um rendimento de grãos 9,93% maior ($3418\text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) do que a observada no CDCTA ($3109\text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$). Ao mesmo tempo, a cultivar Pioneer P98Y11 RR apresentou um rendimento de grãos médio dos dois locais ($3360\text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) 5,46 % maior do que a cultivar BRS Favorita RR ($3168\text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$).

Tabela 9 Resultados médios do rendimento de grãos em $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de duas cultivares de soja cv. BRS Favorita RR e cv. Pioneer P98Y11 RR dentro de cada dose e cada forma de aplicação de Se, do experimento biofortificação agrônômica da soja, Lavras – MG - 2013.

DOSES	BRS Favorita RR				Pioneer P98Y11 RR			
	FOL	SOL	SEM	Médias	FOL	SOL	SEM	Médias
UFLA								
0	3824	3313	3012	3383	4014	4020	3700	3911
10	3403	3250	3061	3238	3890	3763	3688	3780
20	3469	3366	3343	3393	3000	3627	3172	3266
30	3319	3137	3365	3274	3301	3564	3171	3345
40	2840	3241	2640	2907	3722	3765	3576	3688
Médias	3771	3261	3084	3239b	3585	3748	3461	3598a
CDCTA								
0	3194	3341	3299	3278	2635	3187	3237	3020
10	3107	3022	3278	3136	2907	3035	3167	3036
20	3373	2938	3041	3118	3480	3162	3102	3248
30	3212	3403	2512	3043	3309	3263	3495	3356
40	2877	3192	2656	2908	3077	3364	2415	2952
Médias	3153	3179	2957	3096a	3081	3202	3083	3122a
Geral				3168b				3360a
UFLA	3418A							
CDCTA	3109B							

Médias seguidas da mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha não diferem entre si pelo teste Tukey no nível de 5%

As cultivares apresentaram comportamento diferente devido à interação com os locais onde foram plantadas. De acordo com os resultados da Tabela 9, podemos observar que para a área experimental UFLA, as cultivares tiveram rendimentos diferenciados, sendo que a cultivar Pioneer P98Y11 apresentou uma produção significativamente maior ($3598 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) 11,08% quando comparada à cultivar BRS Favorita RR ($3239 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$). Já para a área experimental CDCTA, as cultivares não mostraram diferenças significativas no rendimento de grãos, produzindo $3122 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ a cultivar Pioneer P98Y11 RR e $3096 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ a cultivar BRS Favorita RR.

No estudo da interação das cultivares com as doses e os locais estudados, verificou-se que houve efeito significativos dos tratamentos para a cultivar P98Y11 na localidade experimental UFLA e doses (Tabela 10).

Tabela 10 Resultados da análise de variância do desdobramento de local dentro de cada cultivar para os níveis de selênio, no experimento biofortificação agrônômica da soja, Lavras – MG - 2013.

Fontes	Cv Local	GL	SQ	QM	Pr>Fc
Níveis	Fav UFLA	4	1402898,82	350724,71	0,2175
Níveis	Fav CDCTA	4	659766,90	164941,73	0,6013
Níveis	Pio UFLA	4	2820014,76	705003,69	0,0233*
Níveis	Pio CDCTA	4	1056767,96	264191,99	0,3586
Erro		116	27818785,65	239825,73	

*Significativos a 5 % pelo teste de F.

O objetivo principal da biofortificação agrônômica é o de enriquecer as partes comestíveis da cultura em questão sem que isso afete negativamente a produtividade. Levando isso em consideração, verificamos que para a cultivar Favorita na UFLA, assim como para a cv. BRS Favorita RR e a cv. Pioneer P98Y11 RR para a localidade CDCTA, os tratamentos testados não mostraram diferenças no rendimento de grãos das mesmas (Tabela 10). Como mencionado anteriormente, na localidade da UFLA a cv. Pioneer P98Y11 RR apresentou um comportamento significativamente diferente. Pode-se observar que o rendimento de grãos dessa cultivar apresentou ajuste quadrático em relação às doses aplicadas de selenato de sódio (Figura 3).

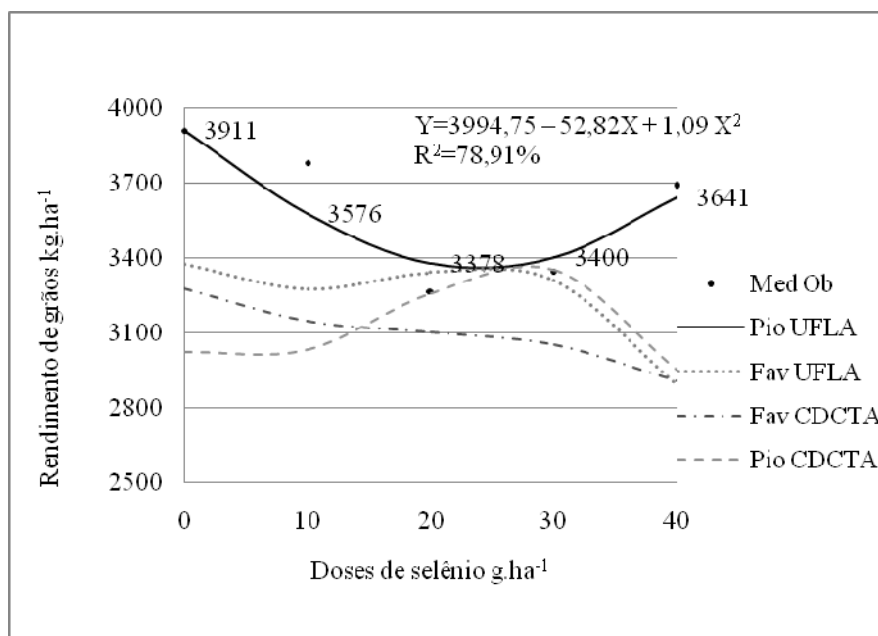


Figura 3 Variação do rendimento de grãos de soja cultivar Pioneer P98Y11RR em função da aplicação de diferentes doses selenato de sódio na área experimental do Departamento de Agricultura da UFLA, Minas Gerais – 2013.

À medida que se aumentou a dose, verificou-se que houve uma diminuição do rendimento de grãos até um mínimo de 3354 kg.ha⁻¹ de soja, quando a dose de Se chegou a 24,22g.ha⁻¹. Posteriormente, verificam-se incrementos do rendimento de grãos conforme a dose de Se aumenta, até o ponto determinado no experimento chegando a 3641 kg.ha⁻¹ para a dose de 40g.ha⁻¹ (Figura 3).

Vários fatores podem ter contribuído para que o rendimento de grãos apresentasse esse tipo de comportamento. O primeiro que pode ser mencionado é o fator genético envolvido na absorção de selênio dentro de cada cultivar para cada local.

Ramos et al. (2011a), utilizando experimento para testar a capacidade diferenciada de diversas cultivares de alface em absorver Se, mostraram que a mesma está relacionada com a expressão diferenciada dos genes envolvidos na absorção e assimilação do Se/S. Como dito anteriormente, a presença de compostos isólogos nas plantas indica que esses elementos competem em processos biológicos que afetam a absorção, translocação e assimilação nos processos de crescimento das plantas (SORS; ELLIS; SALT, 2005).

Outro fator que pode estar relacionado com o desempenho da cultivar pode ter sido uma variação no acúmulo de micronutrientes principalmente do molibdênio na forma de molibdato (forma absorvida pelas plantas). O Mo no solo tem a forma aniônica (HMoO_4^- e MoO_4^{2-}), podendo ser absorvido de maneira similar ao que acontece com o sulfato e fosfato. A absorção desse nutriente pode ser estimulada pelo ânion fosfato, no entanto, o sulfato a inibe, por competição (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997).

Sendo assim, o selenato e o sulfato concorrendo pelos sítios de absorção podem ter diminuído a absorção de Mo no solo ocasionando menor síntese da enzima nitrogenase, com conseqüente redução da fixação biológica do nitrogênio e diminuição do rendimento de grãos da soja.

Ramos et al. (2011b), estudando o efeito da adubação com selênio em plantas de brócolis, mostraram decréscimo no acúmulo de micronutrientes na metade das cultivares que foram estudadas com o uso de $20 \mu\text{M Na}_2\text{SeO}_4$ em experimento em vasos.

No presente estudo, após ter ocorrido a diminuição do rendimento de grãos até na dose de $22,4 \text{ g}\cdot\text{ha}^{-1}$, um efeito sinérgico pode ter ocorrido entre o S e o Se, sendo promovida o acúmulo do primeiro na cultura à medida que as doses de selênio foram incrementadas, explicando assim o aumento da produtividade.

Boldrin et al. (2012); Ramos et al. (2011a); Mikkelsen e Wan (1990) ao avaliarem o efeito do selenito e do selenato no teor de S verificaram incrementos da absorção de S nas culturas estudadas. Segundo esses autores, a interação sinérgica entre o selenato e o sulfato pode ocorrer em diversas espécies vegetais.

Ainda referindo-se à Figura 3, mesmo não ocorrendo diferenças significativas no rendimento de grãos com as doses e os locais utilizados no experimento dos outros três níveis (BRS Favorita RR UFLA, BRS Favorita RR CDCTA, Pioneer P98Y11 RR CDCTA) alocou-se as curvas do comportamento do rendimento de grãos para mostrar que a partir da dose de 25g existe uma tendência à diminuição da mesma, resultados esses que deveriam ser levados em consideração para estudos posteriores de recomendação de doses a serem usadas no processo de biofortificação agrônomo.

3.6 Acúmulo de selênio (ASe)

As doses de selenato utilizadas, as formas de aplicação e a interação entre esses fatores influenciaram significativamente o acúmulo de Se nos grãos (Tabela 2). Em se tratando de biofortificação agrônomo, seria possível dizer que o acúmulo do elemento estudado seria um dos pontos mais importantes do processo. O conteúdo do elemento nas partes comestíveis das plantas permite uma idéia do potencial existente de transferir esse elemento aos seres humanos ou animais que consumissem esse alimento.

Na Tabela 11, pode-se observar os resultados da análise do desdobramento das doses dentro de cada forma de aplicação utilizadas.

Tabela 10 Resultados da análise de variância do desdobramento de doses dentro de formas de aplicação obtidas no experimento Biofortificação agrônômica da soja, Lavras – MG - 2013.

Fontes	GL	QM	Pr>Fc
FA SEMENTE	4	0,256944	0,9465
FA FOLIAR	4	31,526365	0,0000**
FA SOLO	4	0,126188	0,9854
Erro	116	1,399981	

** Significativo a 1% pelo teste de F.

Nesse experimento foi possível verificar que a aplicação do Se na forma foliar possibilitou acúmulo médio significativamente maior desse elemento. As outras duas formas de aplicação de selênio não mostraram aumentos de acúmulo à medida que as doses do elemento foram aumentadas. Pode-se observar que a aplicação de Se na forma foliar apresentou um comportamento linear crescente no que se refere ao acúmulo de selênio nos grãos, chegando a um total 3,9942mg.Kg⁻¹ com a dose de 40 g.ha⁻¹ (Figura 4).

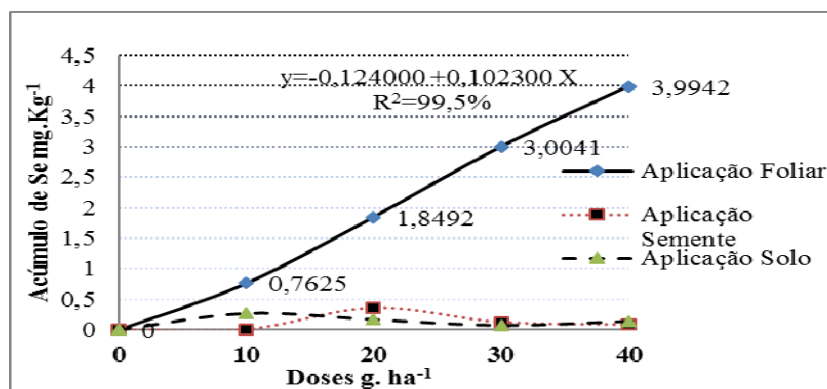


Figura 4 Variação do acúmulo de selênio dos grãos de soja (mg.kg⁻¹) em função de doses de selenato de sódio aplicadas de três diferentes formas no experimento biofortificação agrônômica da soja.

A forma de aplicação de Se via foliar mostrou-se muito promissora no sentido de enriquecer os grãos de soja com selênio, usando a fonte selenato de sódio. Aparentemente não foi observada fitotoxidez desse elemento quando aplicado via foliar. A aplicação do Se no estágio R5, permitiu que a planta apresentasse um desenvolvimento normal até o momento de aplicação do elemento o que permitiu uma translocação mais efetiva para os grãos colhidos.

Tanto o selenato quanto o sulfato são transportados através da membrana plasmática contra os seus gradientes eletroquímicos relatados por Lass e Ullrich-Eberius (1984); Hawkesford et al. (1993) citados por Sors, Ellis e Salt (2005).

Segundo Sors, Ellis e Salt (2005), os transportadores de enxofre de baixa afinidade são expressos nas folhas das plantas e são os responsáveis pelo transporte do Se de maneira intracelular do apoplasto para o simplasto. Assim, verificou-se que a utilização de Se na forma de selenato de sódio via foliar nas doses estudadas apresentam um grande potencial para a biofortificação da cultura da soja.

Considerando que, na forma de aplicação via solo, as doses usadas foram baixas, misturadas ao adubo, colocadas diretamente no solo e incorporado antes do plantio era de se esperar uma baixa resposta ao acúmulo desse elemento.

Em relação às formas de aplicação de Se, é importante relatar alguns pontos. O selênio na forma de selenato de sódio disponível para as plantas, provavelmente diminuiu drasticamente devido a fatores como a acidez ativa (pH), presença de matéria orgânica, quantidade de argila do solo, conteúdo de enxofre no solo, lixiviação do selenato, e a redução do mesmo a selenito e à sua posterior fixação no solo por óxidos e hidróxidos de alumínio, que podem interferir na disponibilidade do elemento. Resultados similares foram descritos por Combs (2001); White e Broadley (2009).

Keskinen et al. (2009 citados por STROUD et al., 2010) mostraram que muito pouco do selênio aplicado no solo apresentou efeito residual após a colheita da cultura de trigo, a adubação com o selenato de sódio até 20 g ha^{-1} , não levou a um acúmulo significativo no solo, sugerindo assim, perdas de selênio não disponíveis para as culturas. Os autores indicam que menos de 20% do selênio aplicado aos solos é aproveitado pelas plantas.

Em relação à aplicação de Se através da embebição das sementes antes do plantio, verificou-se pequeno acúmulo do mesmo nos grãos colhidos. Aqui também vários fatores podem ter influenciado para que esse tipo de acúmulo ocorresse. O primeiro foi o tempo de embebição ao qual as sementes foram submetidas. Apesar da colocação de açúcar como meio de fixar o Se de uma maneira mais efetiva à semente, o tempo de 5 minutos não deve ter sido suficiente para que as mesmas absorvessem de maneira efetiva esse elemento. O segundo fator é que a aplicação do selênio direto na semente deve ter afetado o processo de embebição já que a cinética de absorção de água está relacionado diretamente a uma diferença de potencial hídrico entre a semente e o meio no qual essa se encontra. Um terceiro fator afetando o acúmulo do Se através da embebição refere-se ao fato de que o selenato é absorvido de uma maneira ativa para dentro das plantas através dos transportadores de enxofre e o processo de embebição das sementes ocorre da maneira mencionada anteriormente.

Segundo Bewley e Black (1994); Bradford (1995) citados por Guimarães, Dias e Loureiro (2008), a absorção da água pela semente é regida pelos diferentes componentes do potencial hídrico. Segundo esses autores, a primeira fase ou fase de embebição ou de absorção de água, ou fase I, é um processo regido pelo gradiente de potencial hídrico (Ψ_w) entre a semente e seu ambiente. É um processo puramente físico, que depende somente da ligação da água aos colóides da semente. Essa absorção de água pela semente ocorrerá

independentemente de sua qualidade fisiológica, ou seja, em sementes viáveis e inviáveis, pois basta que contenham sítios de ligação ou de afinidade pela água.

Castro e Hilhorst (2004 citados por GUIMARÃES; DIAS; LOUREIRO, 2008) indicam que o potencial mátrico (Ψ_m) é o primeiro responsável pela embebição das sementes, devido à capacidade das paredes celulares e macromoléculas (material de reserva) atraírem água como resultado de interação da água com a matriz.

Semelhantemente, o Ψ_s desempenha importante papel na embebição das sementes, devido à alta concentração de solutos no interior das células do embrião, o que estimula a absorção de água para o seu interior, recuperando assim sua condição de semente hidratada, garantindo a expansão dos tecidos.

Quanto menor o Ψ_s , menor será o Ψ_w dessa semente, mais água será absorvida até o ponto em que haja uma contraposição de pressão gerada pelo Ψ_p do tegumento e/ou da parede celular das células que a compõem. Quando esta contraposição é de mesma intensidade que a gerada pelo Ψ_s , diz-se que estas células atingiram o equilíbrio dinâmico, ou seja, $\Psi_w = 0$, e assim, não mais absorverão água.

Efeitos fitotóxicos foram observados após o plantio das sementes embebidas, mas as plantas conseguiram se recuperar ao longo do período vegetativo da cultura. Em algumas plantas foi possível observar uma diminuição inicial do crescimento das mesmas.

Podem-se verificar resultados positivos obtidos na área de biofortificação agrônômica nesses experimentos. Isto permite pensar que deveriam ser realizados investimentos na experimentação nessa linha específica. Assim poderiam ser desenvolvidos projetos em escala macro dentro das regiões brasileiras com menores níveis de ocorrência do selênio nas populações, da mesma maneira como são realizadas em países desenvolvidos. As pesquisas na

área de biofortificação deverão ser implementadas de uma maneira que torne viável a utilização de processos de enriquecimento de alimentos. A viabilidade técnica e econômica para os produtores de alimentos do nosso país são fatores que não devem ser esquecidos na hora de realizar ou orientar as pesquisas. Os custos onerados pela aplicação de novas técnicas deverão estar diretamente relacionados com as vantagens econômicas e de qualidade nutricional dos produtos produzidos através dessas tecnologias. O selênio não é um elemento renovável na natureza, daí a importância de aumentar o número de pesquisas em relação às fontes, formas e épocas de aplicação do selênio nas diferentes culturas no Brasil.

4 CONCLUSÕES

A altura da inserção do primeiro legume, peso de 100 sementes e acúmulo de Se nas sementes são alterados significativamente em função das formas de aplicação do selênio.

As doses de selênio utilizadas alteram o acúmulo de Se nas sementes.

A aplicação de selênio via foliar promoveu efeito positivo no acúmulo nos grãos produzidos à medida que níveis crescentes desse elemento foram aplicados

A biofortificação agronômica da soja com Se melhora a qualidade nutricional dessa cultura incrementando a disponibilidade desse elemento nas dietas de animais e seres humanos.

REFERÊNCIAS

ANTUNES, F. Z. Caracterização climática do estado de Minas Gerais. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 12, n. 138, p. 9-13, jun. 1986.

BERNARD, R. L.; CHAMBERLAIN, D. W.; LAWRECE, R. D. **Results of the cooperative uniform soybean tests**. Washintong: USDA, 1965.134 p.

BOLDRIN, P. F. et al. Selenato e selenito na produção e biofortificação agrônômica com selênio em arroz. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, n. 6, p. 831-837, jun. 2012.

COMBS, F. G. Selenium in global food systems. **British Journal of Nutrition**, Cambridge, v. 85, p. 517-547, 2001. Disponível em: <http://journals.cambridge.org/download.php?file=%2FBJN%2FBJN85_05%2FS0007114501000782a.pdf&code=c9918b8ef0118fe415bc15f69c7fae16325>. Acesso em: 10 mar. 2013.

DJANAGUIRAMAN, M. et al. Selenium - an antioxidative protectant in soybean during senescence. **Plant and Soil**, The Hague, v. 272, n. 1-2, p. 77-86, May 2005. Disponível em: <<http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11104-004-4039-1>>. Acesso em: 10 abr. 2013.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Indicação da cultivar BRS Favorita RR para Goiás e Distrito Federal**. Disponível em: <www.cpac.embrapa.br/baixar/1100/t>. Acesso em: 4 jul. 2013.
FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, nov./dez. 2011.

GUIMARÃES, M. A.; DIAS, D. F. S; LOUREIRO, M. E. Hidratação de sementes. **Revista Trópica - ciências agrárias e biológicas**, Chapadinha, v. 2, n. 1, p. 31-39, 2008.

HEIFFIG, L. S. **Plasticidade da cultura da soja (Glicine max (L) Merrill) em diferentes arranjos espaciais**. 2002. 81 p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia)-Univesidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

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

MIKKELSEN, R. L.; WAN, H. F. The effect of selenium on sulfur uptake by barley and rice. **Plant and Soil**, The Hague, v. 121, p. 151-153, 1990.

MONICO, J. F. G. et al. Acurácia e precisão: revendo os conceitos de forma acurada. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, v. 15, n. 3, p. 469-483, jul./set. 2009.

PIMENTEL-GOMES, F. **Curso de estatística experimental**. 15. ed. Piracicaba: FEALQ, 2009. 451 p.

PIRES, M. L. P. et al. Desempenho de genótipos de soja, cultivados na região centro – sul do estado do Tocantins, safra 2009/2010. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 28, p. 214-233, 2012.

RAMALHO, M. A. P. et al. **Aplicações da genética quantitativa no melhoramento de plantas autógamas**. 1. ed. Lavras: UFLA, 2012. 522 p.

RAMOS, S. J. et al. Selenium accumulation in lettuce germplasm. **Planta**, Berlin, v. 233, p. 649-660, 2011a.

RAMOS, S. J. et al. Evaluation of genotypic variation of Broccoli (*Brassica oleracea* var. *italica*) in response to selenium treatment. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Easton, v. 59, p. 3657-3665, 2011b.

RESENDE, M. D. V. **Genética biométrica e estatística no melhoramento de plantas perenes**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2002. 975 p.

RESENDE, M. D. V.; DUARTE, J. B. Precisão e controle de qualidade em experimentos de avaliação de cultivares. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 37, n. 3, p. 182-194, set. 2007.

RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; VICENTE, V. H. A. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa, 1999. 359p.

RIOS, J. J. et al. Regulation of sulphur assimilation in lettuce plants in the presence of selenium. **Plant Growth Regulation: an international journal on natural and synthetic regularors**, Dordrecht, v. 56, n. 1, p. 43-51, May 2008.

SORS, T. G.; ELLIS, D. R.; SALT, D. E. Selenium uptake, translocation assimilation and metabolic fate in plants. **Photosynthesis Research**, Dordrecht, v. 86, n. 3, p. 373-389, Dec. 2005. Disponível em: <<http://link.springer.com/article/10.1007/s11120-005-5222-9>>. Acesso em: 10 jan. 2013.

STROUD, J. L. et al. Soil factors affecting selenium concentration in wheat grain and the fate and speciation of Se fertilisers applied to soil. **Plant and Soil**, The Hague, v. 332, n. 1-2, p. 19-30, July 2010.

WHITE, P. J.; BROADLEY, M. R. Biofortification of crops with seven mineral elements often lacking in human diets - iron, zinc, copper, calcium, magnesium, selenium and iodine. **New Phytologist**, Cambridge, v. 182, n. 1, p. 49-84, 2009.

CAPÍTULO 3

BIOFORTIFICAÇÃO AGRONÔMICA DA SOJA COM SELENITO DE SÓDIO, VIA ADUBAÇÃO FOLIAR

RESUMO

O selênio é um oligoelemento essencial ao homem e aos animais. Atualmente existem muitos estudos de interesse em vários países levando em consideração as propriedades anticancerígenas do elemento, assim como as suas propriedades antioxidantes, principalmente dentro dos programas de biofortificação em diferentes tipos de alimentos e culturas. O enriquecimento de grãos de soja que possuam na sua composição formas orgânicas mais seguras desse elemento para serem consumidas é uma das grandes linhas de pesquisa para a biofortificação com selênio. Objetivou-se com este trabalho verificar os efeitos da adubação foliar com selenito de sódio na biofortificação agrônômica da cultura da soja, utilizando sete doses de selênio (0;10; 20; 40; 60; 120; 200) g.ha⁻¹ em um delineamento de blocos casualizados completos com 3 repetições e parcelas de quatro linhas de cinco metros. A aplicação foliar foi realizada no estágio R5 da cultivar BRS Favorita RR. Os caracteres avaliados foram altura da inserção do primeiro legume, altura da planta, rendimento de grãos em kg.ha⁻¹ e o conteúdo acumulado de selênio nos grãos da soja. A aplicação do selênio via foliar promoveu o acúmulo crescente desse elemento nos grãos, embora tenha propiciado um efeito fitotóxico em todas as doses utilizadas nesse trabalho.

Palavras-chave: Fitotoxidez. Selênio. Características agrônômicas.

ABSTRACT

Selenium is a trace element essential for human and animals. Currently there are many studies of interest in various countries taking into consideration the anticancer properties of that element, as well as its antioxidant properties especially within biofortification programs for different type of food and crops. The enrichment of soybeans having safer organic forms of that element in its composition for consumption is one of the main lines of research for selenium biofortification. The objective of this work was to verify the effects of foliar fertilization with sodium selenite in the agronomic biofortification of soybean. Seven doses of selenium (0;10; 20; 40; 60; 120; 200) g.ha⁻¹ as sodium selenite were applied to the soybean cultivar BRS Favorita RR in a randomized complete block design with three replications in plots of four rows of five meters were evaluated. Foliar application was held at the R5 stage of the culture. The evaluated characters were the first pod height, plant height, yield (kg ha⁻¹) and accumulated content of selenium in the soybean grains. The application of selenium through foliar fertilization promoted a growing accumulation of that element in grains, although it has propitiated a phytotoxic effect at all doses used in this work.

Keywords: Phytotoxicity. Selenium. Agronomic characteristics.

1 INTRODUÇÃO

O interesse pelo selênio (Se) aumentou nas duas últimas décadas dada a sua importância nutricional para os seres humanos e animais (ZHU et al., 2009; RIOS et al., 2010), embora não se conheçam funções de essencialidade nas plantas.

Esse elemento em pequenas concentrações pode contribuir para o crescimento de algumas espécies, e ao mesmo tempo, pode acumular nos grãos das mesmas, conferindo características desejáveis para consumo. A ingestão diária de selênio é baixa por um grande número de pessoas em vários países. Esse fato pode ser devido a sua baixa disponibilidade nos solos, propiciando assim baixas concentrações do elemento nos tecidos das plantas (HAWKESFORD; ZHAO, 2007).

As dietas de mais da terceira parte da população mundial carecem de um ou mais dos elementos essenciais, sendo o selênio um desses microelementos. A procura de maneiras ou formas de resolver essa situação tem na atualidade muita dedicação e esforços por parte dos cientistas de diversos países. Existem maneiras pelas quais o selênio pode chegar a fazer parte da dieta regular dos seres humanos e animais, através da diversificação dietética, suplementação mineral de animais, fortificação de alimentos de origem vegetal ou animal, ou aumento na concentração e/ou biodisponibilidade dos elementos minerais nos alimentos através do processo denominado de biofortificação (WHITE; BROADLEY, 2009).

O enriquecimento de alimentos com esse elemento, principalmente os vegetais e os seus derivados, é o ponto principal de trabalhos sendo realizados ao redor no mundo atualmente. Hoje é necessário permitir à população ter acesso a uma dieta com melhor diversidade de alimentos, aliados a características nutritivas melhoradas, principalmente a partir do processo denominado

biofortificação. Grande parte da população mundial vive em regiões onde o solo apresenta um desbalanço mineral, o que pode caracterizar a falta frequente de nutrientes essenciais como Ferro, Zinco, Cálcio, Magnésio, Cobre, Iodo e o Selênio.

Uma das principais alternativas para resolver esse problema é aumentar as concentrações desses minerais nos cereais e vegetais de maior consumo, o que pode ser realizado através da adubação mineral das culturas ou do melhoramento genético das mesmas. Esses dois processos em conjunto são denominados hoje como o processo de biofortificação. Evidências científicas mostram que essa técnica é promissora para aumentar a biodisponibilidade ou concentrações biodisponíveis de elementos minerais nos alimentos provenientes das culturas sem comprometer a produtividade das mesmas.

Em função do exposto, objetivou-se com este trabalho verificar os efeitos da adubação foliar com selenito de sódio (Na_2SeO_3) na biofortificação agrônômica da soja avaliando caracteres agrônômicos.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Caracterização da área experimental

O experimento foi conduzido na Fazenda Milanez, localizada no município de Itutinga-MG, que se encontra à latitude de 21°23'29,8" Sul, longitude de 044°39'13,2" Oeste e altitude média de 958 m, no ano agrícola 2010/2011.

O clima da região, baseado na classificação internacional de Köeppen, é do tipo Cwa, temperado úmido, com verão quente e inverno seco, caracterizado por uma pluviosidade de 23,4 mm no mês mais seco e de 295,8 mm no mês mais chuvoso. A temperatura média é de 22,1°C no mês mais quente e de 15,8°C no mês mais frio, sendo a precipitação média anual de 1529,7 mm (BRASIL, 1992).

A área experimental utilizada teve o solo classificado como do tipo Cambissol. As características químicas do solo da área experimental são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 Resultados das análises químicas de solo nas amostras coletadas na profundidade 0 - 20 cm, na Fazenda Milanez no município de Itutinga - MG - 2010.

pH (H ₂ O)	mg.dm ⁻³		cmolc.dm ⁻³							%
	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	t	T	
6,1	2,5	129	3,0	1,0	0,0	1,7	4,3	4,3	6,0	71,8
dag.kg ⁻¹	mg.L ⁻¹		mg.dm ⁻³							
	MO	Prem	Zn	Fe	Mn	Cu	B	S	Se	
3,6	9,9	0,8	46,6	6,1	1,4	0,4	22,7	Não detectável		

Análises realizadas no Laboratório de Análise de Solo do Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras.

2.2 Delineamento experimental e tratamentos analisados

O experimento foi conduzido no delineamento em blocos casualizados (DBC) com os tratamentos: 7 doses de selenito de sódio equivalentes a (0;10; 20; 40; 60; 120; 200) g.ha⁻¹ de selênio, utilizando calda de 200L.ha⁻¹ e 3 repetições. A aplicação foliar foi realizada no estágio R5 da Cultivar BRS Favorita RR.

2.3 Instalação e condução dos experimentos

As parcelas experimentais foram constituídas de 4 linhas com 5 metros de comprimento, espaçadas de 50 centímetros, sendo utilizadas para avaliação as duas fileiras centrais, com a eliminação de 0,50 metros nas extremidades das mesmas, totalizando 4,0 m².

O preparo do solo foi composto de uma aração e uma gradagem. A abertura dos sulcos de semeadura foi realizado com tração mecanizada.

Prévia análise e correção do pH do solo a adubação foi realizada de acordo com Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, CFSEMG (1999). A adubação de base foi realizada manualmente no sulco de plantio adotando-se 400 kg ha⁻¹ da formula NPK 4-30-10.

As sementes de soja foram inoculadas antes da semeadura com *Bradyrhizobium japonicum*, utilizando-se o inoculante turfoso Nitral na proporção de 1.200.000 bactérias por semente. A semeadura foi realizada no início do período chuvoso, na primeira quinzena de novembro de 2010, à profundidade de 2 a 3 cm, utilizando-se, após o desbaste realizado aos 15 dias do plantio, uma densidade de 12 plantas por metro linear.

Para o controle de plantas daninhas utilizou-se o herbicida glyphosato em pós emergência, em uma única aplicação de 3 L.ha⁻¹. Quando necessário foi realizado o controle mecânico através de capinas manuais.

Os demais tratos culturais foram realizados de acordo com as recomendações para a cultura da soja na região.

2.4 Características avaliadas e análise estatística

As seguintes características foram avaliadas: altura de plantas (cm), altura de inserção do primeiro legume (cm), rendimento de grãos (kg.ha⁻¹) e acúmulo de selênio nos grãos (mg.kg⁻¹).

A altura do primeiro legume, altura da planta, foram determinados por ocasião da colheita em cada parcela tomando-se aleatoriamente dez plantas das fileiras úteis.

O rendimento foi determinado colhendo-se as plantas da área útil que após trilhadas e beneficiadas tiveram seu peso corrigido à umidade de 13% e transformado em kg.ha⁻¹.

Os teores de selênio dos grãos foram determinados através do método da 3051 do SW – 846 da US_EPA (US- Environmental Protection Agency), com modificações. A leitura foi realizada por espectrometria de absorção atômica com atomização eletrotérmica em forno de grafite. A qualidade analítica dos resultados foi avaliada pela análise dos materiais de referência internacional certificados (BCR402, White Clover - IRMM), o qual foi incluído em cada bateria de digestão.

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância adotando modelo semelhante ao apresentado por (RAMALHO et al., 2012). Para comparação das doses testadas procedeu-se análise de regressão. Todas as

análises foram realizadas com o suporte do software SISVAR (FERREIRA, 2011).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O resumo da análise de variância dos dados fenotípicos está apresentado na Tabela 2. Observa-se que não se detectou diferença significativa para os caracteres altura das plantas, altura da inserção do primeiro legume e o rendimento de grãos, considerando as diferentes doses de selenito testadas.

Tabela 2 Resumo das análises de variância dos dados relativos à altura de plantas (AltPlan), altura de inserção do primeiro legume (AltLeg), rendimento de grãos (Rend) e acúmulo de selênio nos grãos (ASe), obtidas no experimento, biofortificação agrônômica da soja com selenito de sódio, via adubação foliar, Itutinga - MG - 2010-2011.

Fontes de variação	GL	Quadrados médios			
		AltPlan	AltLeg	Rend	ASe
Blocos	2	13.90	31.41	3672.19	0.005
Doses	6	16.49	3.63	263734.86	0.477**
Resíduo	12	16.67	4.95	189170.86	0.007
CV		6,24%	13,04%	18,69%	14,14%
Média geral		65,41	17,06	2326,76	0,58

** Significativo a 1% pelo teste F

Isto aconteceu provavelmente devido ao selênio ter sido aplicado nas plantas de soja no estágio reprodutivo R5 (grãos na vagem com 3mm de comprimento num dos 4 últimos nós do caule, com folha completamente desenvolvida). Segundo a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, EMBRAPA (2013), a soja BRS Favorita RR é uma cultivar de crescimento determinado.

O hábito de crescimento determinado caracteriza-se pela finalização do crescimento vegetativo a partir do início do florescimento (SEDIYAMA et al., 2009). Assim a aplicação de Se via foliar, no estágio usado no experimento, não

poderia afetar o crescimento da planta visto que essa já havia atingido o máximo de crescimento vegetativo. Para o acúmulo de selênio nos grãos de soja, detectou-se diferença significativa ($p < 0,01$) para as doses de selênio aplicadas. Os resultados evidenciam o efeito positivo no acúmulo de Se à medida que se aumentam as doses de selenito de sódio.

A precisão experimental analisada pela estimativa do coeficiente de variação (CV%) possibilita inferir que os experimentos foram bem conduzidos. De acordo com Pimentel-Gomes (2009), experimentos precisos devem apresentar CV% menor do que 20%, fato este observado no presente trabalho.

Analisando os valores acumulados de selênio nos grãos, observou-se que à medida que se aumentaram as doses de selenito de sódio, aumentou-se o acúmulo de selênio nos grãos. A quantidade média acumulada com a maior dose aplicada via foliar, correspondente a 200 g ha^{-1} foi de $1,157 \text{ mg Se.kg}^{-1}$ de matéria seca o que evidencia a capacidade de acúmulo do elemento por parte do grão (Figura 1).

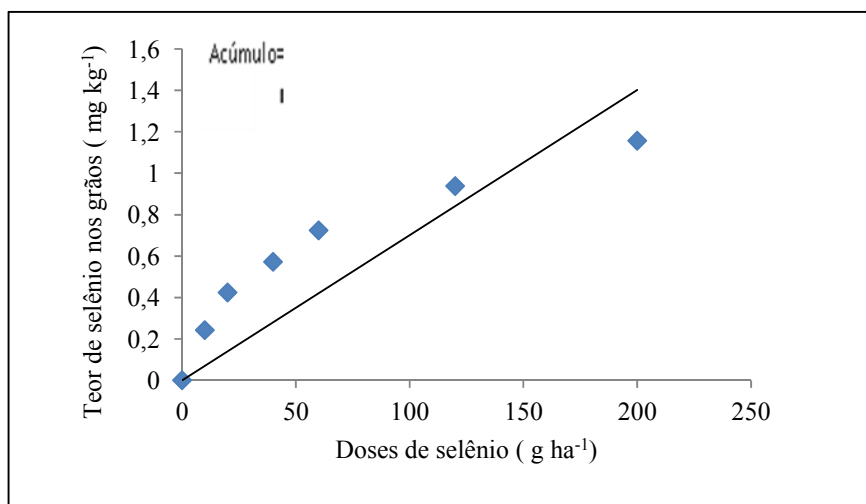


Figura 1 Variação da acúmulo de selênio nos grãos de soja em (mg.kg^{-1}) de acordo com a variação das doses de selenito de sódio em (g.ha^{-1}) Itutinga – MG - 2010/2011.

Entretanto no campo foi verificado um efeito fitotóxico em todos os níveis de aplicação foliar (Figura 2).

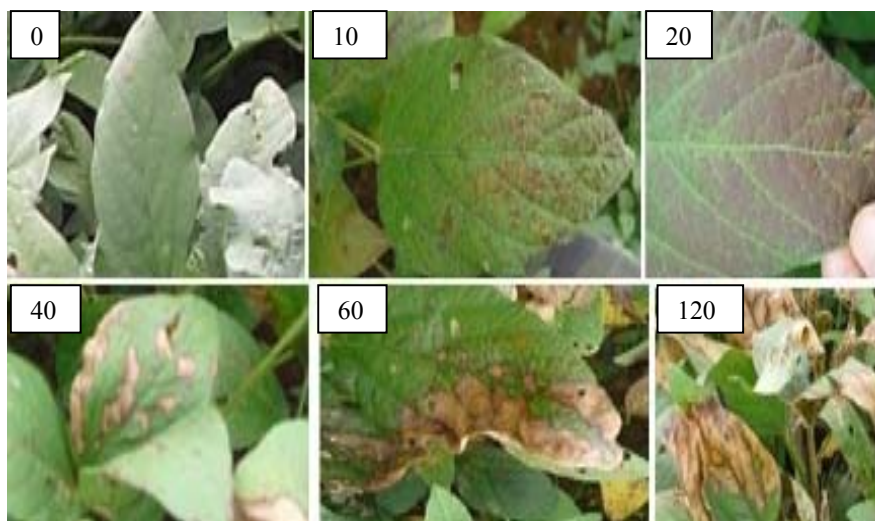


Figura 2 Plantas de soja da cv. BRS Favorita RR apresentando efeito fitotóxico crescente com o aumento da dose de selenito de sódio aplicado via foliar (0; 10; 20; 40; 60; 120 g.ha⁻¹).

É oportuno comentar, contudo, que embora tenha ocorrido uma relação direta entre a dose de selenito de sódio utilizada e o acúmulo nos grãos de soja, observou-se efeito fitotóxico para todos os níveis testados de selênio aplicado via foliar (Figura 1). Segundo Lauchli (1993 citado por SORS; ELLIS; SALT, 2005), o selenito aparenta ser acumulado através da difusão passiva e ao mesmo tempo esse elemento não é acumulado normalmente nas raízes. Contrariamente, Li et al. (2008) indicam que o Se proveniente de plantas tratadas com selenito permanece nas raízes. Esses autores indicam que a absorção de selenito é um processo ativo o qual é mediado pelo menos parcialmente pelos transportadores de fosfato. White e Broadley (2009) e Zhu et al. (2009) indicam que os mecanismos de absorção do ânion selenito são desconhecidos com exatidão.

Segundo Marschner (1995 citado por LYONS et al., 2004), as diferentes espécies de plantas variam amplamente tanto na capacidade de acúmulo de selênio, como na capacidade de tolerar altas concentrações desse elemento nas soluções ou no conteúdo no solo.

Estes resultados corroboram os relatos existentes na literatura, os quais evidenciam que plantas de tabaco e soja são sensíveis ao selênio e poderão ser afetadas por esse elemento em meio de cultura segundo Martin e Trelease (1938 citados por LYONS et al., 2004).

Segundo Brown e Shrift (2008), a toxicidade do selenato e do selenito para a maioria das plantas pode ser atribuída à combinação de três fatores. Em primeiro lugar, o selenato e o selenito são prontamente absorvidos do solo pelas raízes e translocados para outras partes das plantas. Em segundo lugar, reações metabólicas convertem estes ânions em formas orgânicas de selênio; e em terceiro lugar, os metabolitos orgânicos de selênio os quais agem como análogos de compostos sulfurados essenciais e interferem com reações bioquímicas celulares. O selenito é rapidamente convertido em formas orgânicas de Se, as quais são incorporadas em proteínas em substituição ao S, causando toxidez (HOPPER; PARKER, 1999). A incorporação do selênio nos aminoácidos análogos seleniometionina e seleniocisteína, no lugar dos aminoácidos sulfurados equivalentes, é considerada a causa principal da toxidez de selênio. As diferenças físicas e químicas entre o selênio e o enxofre resultarão em pequenas mudanças sendo estas significativas nas propriedades biológicas das proteínas que tiveram o enxofre substituído pelo selênio (BROWN; SHRIFT, 2008).

4 CONCLUSÕES

A aplicação do selênio via foliar na cultura da soja promove o acúmulo crescente desse elemento nos grãos.

Há efeito fitotóxico de todas as doses aplicadas de selenito de sódio aplicado via foliar à cultura da soja.

A altura da planta, inserção do primeiro legume e rendimento de grãos não foram afetados significativamente em função das doses aplicadas.

REFERÊNCIAS

BRASIL. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. **Normais climatológicas**: 1961-1990. Brasília, 1992. 84 p.

BROWN, T. A.; SHRIFT, A. Selenium: toxicity and tolerance in higher plants. **Biological Reviews**, v. 5, p. 59-84, 2008. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1469-185X.1982.tb00364.x>>. Acesso em: 10 mar. 2013.

COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais**: 5ª aproximação. Viçosa, 1999. 359 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Indicação da cultivar BRS Favorita RR para Goiás e Distrito Federal**. Disponível em: <www.cpac.embrapa.br/baixar/1100/t>. Acesso em: 4 jul. 2013.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, nov./dez. 2011.

HAWKESFORD, M. J.; ZHAO, F. J. Strategies for increasing the selenium content of wheat. **Journal of Cereal Science**, London, v. 46, n. 3, p. 282-292, 2007.

HOPPER, J.; PARKER, D. Plant availability of selenite and selenate as influenced by the competing ions phosphate and sulfate. **Plant and Soil**, The Hague, n. 210, p. 199-207, 1999.

LI, H. F. et al. Selenium uptake, translocation and speciation in wheat supplied with selenate or selenite. **New Phytologist**, Cambridge, v. 178, n. 1, p. 92-102, Jan. 2008.

LYONS, G. H. et al. High-selenium wheat: agronomic biofortification strategies to improve human nutrition. **Food Agricultural Environmental**, v. 2, p. 171-178, 2004.

PIMENTEL-GOMES, F. **Curso de estatística experimental**. 15. ed. Piracicaba: FEALQ. 2009. 451 p.

RAMALHO, M. A. P. et al. **Aplicações da genética quantitativa no melhoramento de plantas autógamas**. 1. ed. Lavras: UFLA, 2012. 522 p.

RIOS, J. J. et al. Response of nitrogen metabolism in lettuce plants subjected to different doses and forms of selenium. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, London, v. 90, n. 11, p. 1914-1919, 2010. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/jsfa.4032/full>>. Acesso em: 10 mar. 2013.

SEDIYAMA, T. et al. **Tecnologias de produção e usos da soja**. Londrina: Ed. Mecenas, 2009.

SORS, T. G.; ELLIS, D. R.; SALT, D. E. Selenium uptake, translocation assimilation and metabolic fate in plants. **Photosynthesis Research**, Dordrecht, v. 86, n. 3, p. 373-389, Dec. 2005. Disponível em: <<http://link.springer.com/article/10.1007/s11120-005-5222-9>>. Acesso em: 10 jan. 2013.

WHITE, P. J.; BROADLEY, M. R. Biofortification of crops with seven mineral elements often lacking in human diets - iron, zinc, copper, calcium, magnesium, selenium and iodine. **New Phytologist**, Cambridge, v. 182, n. 1, p. 49-84, Jan. 2009. Disponível em: <<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/?term=Biofortification+of+crops+with+seven+mineral+elements+often+lacking+in+human+diets+-+iron%2C+zinc%2C+copper%2C+calcium%2C+magnesium%2C+selenium+and+iodine.>>. Acesso em: 10 mar. 2013.

ZHU, Y. G. et al. Selenium in higher plants: understanding mechanisms for biofortification and phytoremediation. **Trends in Plant Science**, Oxford, v. 14, n. 8, p. 436-442, Aug. 2009. Disponível em:
<<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/?term=Selenium+in+higher+plants%3A+understanding+mechanisms+for+biofortification+and+phytoremediation>>. <Go to ISI>://WOS:000269631900007>. Acesso em: 10 mar. 2013.

CAPÍTULO 4

INFLUÊNCIA DA BIOFORTIFICAÇÃO AGRONÔMICA COM SELÊNIO NA GERMINAÇÃO DE SEMENTES DE SOJA

RESUMO

No Brasil existem poucas pesquisas referentes à biofortificação agrônômica da soja com selênio. Pelos resultados de pesquisas no mundo, existe um baixo conteúdo desse elemento nos alimentos. Como os trabalhos com selênio são escassos, pouco se conhece da influência desse elemento sobre a qualidade das sementes de soja. Para tanto, objetivou-se com este trabalho avaliar o efeito de doses de selênio na germinação de sementes de soja. O experimento foi conduzido em delineamento experimental inteiramente casualizado, com quatro repetições, cujos tratamentos foram dispostos em uma estrutura fatorial 2x2x6, compreendendo duas cultivares (EMBRAPA BRS Favorita RR e Pioneer P98Y11 RR), duas fontes de Se utilizando como fonte de selênio o selenato de sódio (Na_2SeO_4) e selenito de sódio (Na_2SeO_3) e seis doses de selênio (0; 0,05; 0,1; 0,2; 0,3; 0,6 g. L^{-1}Se), sendo que 10 ml dessas soluções foram borrifados sobre cada repetição (50 sementes), no momento da montagem do teste de germinação. As avaliações foram realizadas ao sétimo dia, identificando-se o número de sementes germinadas. Os dados foram submetidos à análise estatística utilizando-se o teste F a 1% de probabilidade e foi realizada análise de regressão polinomial. Observaram-se diferenças significativas entre os tratamentos. Verificou-se a inviabilidade do uso do selênio para processos de biofortificação agrônômica quando se utiliza esse elemento na forma aplicada via sementes nas doses e com as fontes utilizadas. O efeito fitotóxico ocasionado na germinação das sementes através do contato direto com as mesmas diminui o poder germinativo ocasionando perdas. Formas alternativas de aplicação do selênio na cultura da soja deverão ser utilizadas para a biofortificação agrônômica.

Palavras-chave: *Glycine Max.* Selenito. Selenato. Toxidez.

ABSTRACT

There are few researches regarding soybean agronomic biofortification with selenium in Brazil. The research results in the world show that there is a low content of that element in foods. Because of limited researches with selenium, little is known about the influence of that element on the quality of soybean seeds. Therefore, the aim of this study was to evaluate the effect of selenium doses on germination of soybean seeds. The experiment was conducted in a completely randomized design with four replications and the treatments were arranged in a 2x2x6 factorial structure comprising two cultivars (EMBRAPA BRS Favorita RR and Pioneer P98Y11 RR) two sources of Se using the forms of sodium selenate (Na_2SeO_4) and sodium selenite (Na_2SeO_3) and six doses of selenium (0; 0.05; 0.1; 0.2; 0.3; 0.6 $\text{g.L}^{-1}\text{Se}$). There were sprayed 10 ml of those solutions on each repetition (50 seeds) at the installation of the germination test. The evaluations were carried out on the seventh day counting the number of germinated seeds. Data were statistically analyzed using the F test at 5% probability and a polynomial regression analysis was held. Significant differences between treatments were observed. The impracticality of using selenium in processes of agronomic biofortification when using that element as applied to seeds at the doses and sources used was verified. The phytotoxic effect on seed germination caused by direct contact with the seeds may decrease germination power causing losses. Alternative forms of application of selenium in soybeans crops should be used.

Keywords: *Glycine Max.* Selenite. Selenate. Toxicity.

1 INTRODUÇÃO

A soja [*Glycine Max* (L.) Merrill] é a cultura de maior importância socioeconômica do Brasil e uma das maiores do mundo devido às suas várias formas de utilização, melhor fonte de proteína e óleo vegetal, além de ser a principal fonte de matéria prima para a fabricação de biodiesel.

Segundo a Companhia Nacional de abastecimento, CONAB (2013) o Brasil obteve uma produção recorde de 81.456,7 mil de toneladas no ano agrícola 2012/2013, isto devido, principalmente, à expansão da área plantada que foi de 27.721,5 mil hectares.

Essa leguminosa é consumida de formas diversas pelos seres humanos e pelos animais. A busca dos consumidores por produtos e alimentos de boa qualidade nutricional e a preocupação das instituições governamentais e de pesquisas a nível mundial. Com a presença de doenças carênciais nas populações fizeram com que programas de biofortificação surgissem no Brasil e em alguns países no mundo.

Dentro dos programas de biofortificação, o elemento selênio tem sido um elemento alvo, sendo essencial para a nutrição de animais e seres humanos. É sabido que esse elemento possui propriedades antioxidantes e anticancerígenas o que imprime a grande necessidade do uso desse elemento nesses programas.

A biofortificação agrônômica da soja com esse elemento necessita de pesquisas para definir formas sustentáveis de aplicação, doses e fontes adequadas para que essa tecnologia possa chegar a ser adotada pelos produtores em escala comercial.

A biofortificação das sementes de soja antes do plantio como ponto de início para o processo de acúmulo de Se nos grãos a serem consumidos é uma das maneiras possíveis de se realizar esse processo. Diversas pesquisas na área de sementes têm sido dirigidas através da utilização de micronutrientes como

forma de melhorar a qualidade das mesmas, assim como melhorar a produtividade de diversas culturas.

A germinação é uma sequência de eventos químicos e fisiológicos que permite a emergência e o desenvolvimento das estruturas essenciais do embrião, mostrando a sua capacidade para dar origem a uma plântula normal. Dessa forma, deve-se levar em consideração que esse processo pode ser influenciado por fatores externos e internos, e que cada fator pode atuar por si ou em interação com os demais. Diante do exposto, objetivou-se com esse trabalho determinar a influência do selênio na germinação de sementes de soja.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Caracterização da área experimental

O experimento foi conduzido no laboratório de análise de sementes no Departamento de Agricultura da Universidade Federal de Lavras (UFLA).

2.2 Delineamento experimental e tratamentos avaliados

Utilizou-se o delineamento experimental inteiramente ao acaso (DIC), com quatro repetições, cujos tratamentos foram dispostos em uma estrutura fatorial 2x2x6, compreendendo: duas cultivares (EMBRAPA BRS Favorita RR e Pioneer P98Y11 RR), duas fontes de Se utilizando como fonte de selênio o selenato de sódio (Na_2SeO_4) e selenito de sódio (Na_2SeO_3) e seis doses de selênio (0; 0,05; 0,1; 0,2; 0,3; 0,6 g. L^{-1} de selênio em água). As quantidades de cada uma das fontes usadas foram as seguintes: 110; 220; 440; 660; 1320 ppm de selenito e 120; 240; 480; 720; 1440 ppm de selenato como fontes de selênio.

2.3 Instalação e condução do experimento

O teste de germinação foi feito com papel do tipo Germitest® sendo usado o mesmo como substrato. O papel foi enrolado e umedecido com água em 2,5 vezes o peso do papel seco. Foram borrifadas as soluções dos respectivos tratamentos sendo utilizados 10 ml das mesmas sobre cada repetição (50 sementes), no momento da montagem do teste de germinação.

Após esse procedimento os rolos representando cada tratamento foram levados ao germinador em caixas Gerbox, e o aparelho regulado a 25 °C. Foram preparadas 200 sementes por tratamento, em quatro repetições de 50 sementes.

As avaliações foram realizadas ao sétimo dia seguindo as recomendações das Regras para Análise de Sementes (BRASIL, 2009).

2.4 Características avaliadas e análises estatísticas dos dados fenotípicos

A característica avaliada foi a percentagem de germinação das sementes. Realizou-se análise de variância adotando o modelo semelhante ao apresentado por (RAMALHO et al., 2012). Para os fatores qualitativos, as médias foram comparadas usando o teste Scott Knott (1974) ao nível 5% de probabilidade. Para o fator quantitativo, os tratamentos foram comparados adotando-se análise de regressão. Todas as análises foram realizadas com o aporte do software SISVAR (FERREIRA, 2011).

Finalmente, foi determinada a acurácia como parâmetro de qualidade das análises realizadas, já que ela leva em consideração apenas os efeitos aleatórios e os sistemáticos, enquanto a precisão leva em consideração os erros sistemáticos. De acordo com Resende (2002), a acurácia varia de 0 a 100, sendo classificada como: acurácia muito alta ($r_{gg} \geq 90$), alta ($70 \leq r_{gg} < 90$), moderada ($50 \leq r_{gg} < 70$), baixa ($r_{gg} < 50$) O cálculo da acurácia foi realizado a partir do uso do estimador:

$$r_{gg'} = \sqrt{\left(1 - \frac{1}{Fc}\right)} \times 100$$

Em que:

$r_{gg'}$ é a acurácia e o Fc (Snedecor) é o valor da razão de variâncias para os efeitos de tratamentos, associada à análise de variância (RESENDE; DUARTE, 2007).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise de variância para o caráter percentual de germinação evidencia efeito significativo praticamente para todos os fatores analisados e suas interações (Tabela 1).

Tabela 1 Resumo de análise de variância para percentagem de germinação nos diferentes tratamentos do experimento, Influência da biofortificação agronômica com selênio na germinação de sementes de soja. Lavras - MG - 2013.

	4	GL	QM	Fc	Pr>Fc
Fontes (F)	1	1	11616,00	478,700	0,0000
Cultivares (C)	1	1	864,00	35,606	0,0000
Doses (D)	5	5	19165,37	789,813	0,0000
F * C	1	1	294,00	12,116	0,0009
F * D	5	5	1992,70	82,120	0,0000
C * D	5	5	211,50	8,716	0,0000
F * C * D	5	5	360,70	14,865	0,0000
Erro	69	69	24,27		
Total	95	95			$r_{gg}=99,96\%$

A precisão experimental analisada pela estimativa da acurácia ($r_{gg}\%$) na variável estudada foi muito alta e isso possibilita inferir que os experimentos foram bem conduzidos (Tabela 1).

De acordo com as análises, pode-se verificar que a fonte de selênio utilizada teve um efeito altamente significativo na germinação das sementes de soja. As duas fontes de selênio utilizadas no experimento promoveram um efeito fitotóxico nas sementes. O selenito de sódio apresentou um efeito inibitório (fitotóxico) na germinação maior que o selenato de sódio. A percentagem média de germinação de sementes em que foi usado selenito de sódio foi de 19,92%, enquanto que para o selenato foi de 41,92%. A porcentagem média de germinação do experimento sem o uso de selênio foi de 93,4% (Tabela 2).

Tabela 2 Resultados médios da germinação (%) de sementes de soja para diferentes fontes de selênio, dentro de cada dose e cultivar no experimento. Influência da biofortificação agrônômica com selênio na germinação de sementes de soja.

SELENITO	BRS Favorita RR	Pioneer P98Y11RR
DOSE		
g .200L ⁻¹	Médias	Médias
0	96,50	90,00
10	40,50	0,00
20	11,00	0,00
40	0,00	1,00
60	0,00	0,00
120	0,00	0,00
Médias	24,67Ba	15,17Bb
SELENATO	Médias	Médias
0	94,50	92,50
10	67,50	67,50
20	47,50	51,50
40	41,50	28,50
60	8,00	4,00
120	0,00	0,00
Médias	43,17Aa	40,67Aa
Média Cultivares	33,92a	27,92b
Média selenito	19,92B	
Média selenato	41,92A	

Médias seguidas da mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha pertencem ao mesmo grupo pelo teste Skott Knott(1974) a 5% de probabilidade.

Verifica-se, nos resultados observados, efeito fitotóxico no processo germinativo das sementes ocasionado pelas duas fontes do Se. Segundo Terry et al. (2000), em plantas não acumuladoras de Se, a margem de concentração para ocasionar toxidez nas plantas é dependente da forma de selênio acumulado.

Fica evidente que as fontes disponíveis de selênio são fitotóxicas. Ao que tudo indica esse fato deve ocorrer, pois essas formas são prontamente absorvidas pelas plantas e prontamente assimiladas em formas orgânicas de Se. Alguns

estudos indicam que o selenito é mais tóxico do que o selenato devido à rápida conversão do selenito em selenoaminoácidos, que depois poderão ser incorporados nas proteínas das plantas. (ZAYED; LYTLE; TERRY, 1998; ROSENFELD; BEATH, 1964) citados por (TERRY et al., 2000).

Segundo Brown e Shrift (1981 citados por SORS; ELLIS; SALT, 2005), a falta de integração de selenoaminoácidos, selenometionina e selenocisteína, nas proteínas é o maior responsável pela toxidez do Se nas plantas. Segundo esses autores, a habilidade das plantas hiper acumuladoras de acumular e tolerar altas concentrações de Se, está associada com a capacidade metabólica diferenciada que permite a essas plantas desviar a assimilação do Se em proteínas.

Esse mecanismo está exemplificado nas plantas hiperacumuladoras onde a biossíntese de seleniometionina está limitada pela conversão dos precursores da seleniocisteína em aminoácidos não proteicos como o Se-metilselenocisteína, α -glutamil-Se-metilselenocisteína e a selenocitationina. (DUNNILL; FOWDEN, 1967; BROWN; SHRIFT, 1981; BURNELL, 1981) citados por (SORS; ELLIS; SALT, 2005).

A percentagem de germinação teve também variações significativas quando comparadas às cultivares utilizadas. Para a cultivar BRS Favorita RR, a percentagem de germinação média foi de 33,92%, e da cultivar Pioneer P98Y11 RR, de 27,92%, (Tabela 2). Verificou-se então que o efeito fitotóxico ocasionado na cultivar Pioneer P98Y11 RR foi superior ao efeito causado pelo selênio na cultivar BRS Favorita RR.

Apesar de existir uma variação intra e inter específica do acúmulo de selênio nas plantas, a genética do acúmulo do selênio tem sido raramente investigada (ZHU et al., 2009). Ramos et al. (2011) mostraram que em alface existiram diferenças de quase o dobro da quantidade acumulada de Se considerando diferentes cultivares. As cultivares de alface também possuíram

uma resposta diferenciada ao tratamento de selenato e selenito na indução total de acúmulo desse elemento. Esses autores verificaram que a habilidade das cultivares de alface de acumular o Se de maneira diferenciada é devido a uma alteração da expressão de genes envolvidos na assimilação e absorção de Se e S.

Constatou-se uma queda acentuada da germinação até a dose de 0,35 g.L⁻¹ de Se, onde a germinação atingiu em torno de 3%, após esse nível tornou-se praticamente nula. Verifica-se então o grande efeito negativo na germinação que exerceu o Se nas doses usadas quando aplicado diretamente aos grãos (Figura 1).

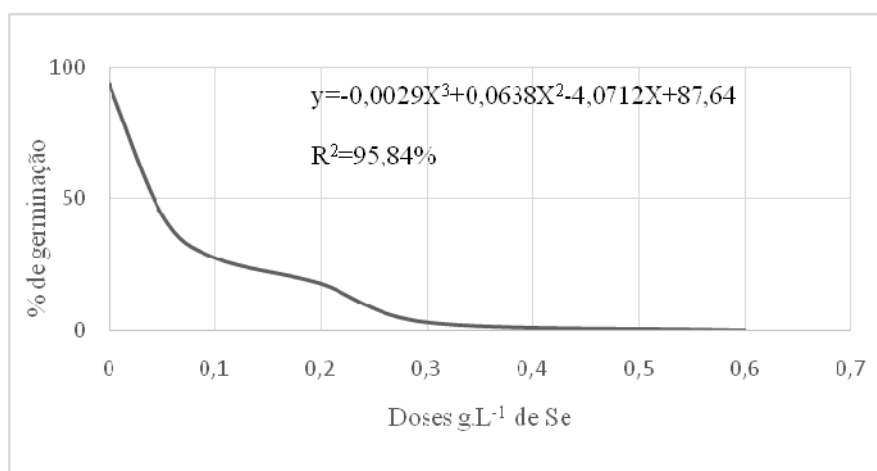


Figura 1 Percentagem de germinação em relação às doses de selênio aplicadas (0; 0,05; 0,1; 0,2; 0,3; 0,6 g. L⁻¹ de selênio em água) no experimento. Influência da biofortificação agrônômica com selênio na germinação de sementes de soja.

O Selênio quando aplicado nessas condições experimentais não teve concorrência nem influência de outro fator ambiental que inibisse a quantidade e velocidade de absorção. Isto pode ter ocasionado um grande acúmulo de Se na

semente, promovendo um efeito fitotóxico, aumentado à medida que as doses eram incrementadas.

Segundo Bewley e Black (1994); Bradford (1995) citados por Guimarães, Dias e Loureiro (2008) a primeira fase ou fase de embebição ou de absorção de água pela semente é um processo regido pela diferença de potencial existente entre a semente e seu ambiente, sendo assim um processo puramente físico, que depende somente da ligação da água aos coloides da semente. Independentemente da qualidade fisiológica das sementes a absorção de água ocorrerá, pois basta que contenham sítios de ligação ou de afinidade pelo líquido.

O Se, penetrando na semente através da influência dos diferentes componentes de potencial hídrico e nesse caso não mais pelos transportadores de enxofre ou fosfato que normalmente são os responsáveis pela absorção de Se, fez com que uma alta concentração de Se entrasse nos grãos, fazendo com que esses não tivessem a capacidade de assimilar todo o selênio que estava envolvido no processo.

Além do que já foi mencionado anteriormente, Brown (1982) citado por Terry et al. (2000) indica que diferenças em tamanho e propriedades de ionização entre o S e o Se pode resultar em alterações significativas das estruturas das proteínas. A ligação entre dois átomos de selênio é aproximadamente um sétimo mais longo e um quinto mais fraco do que a ponte dissulfídrica; Assim a incorporação de SeCys no lugar de Cys nas proteínas pode interferir na formação de pontes dissulfídricas resultando em uma estrutura terciária levemente alterada de proteínas sulfuradas e ao mesmo tempo um efeito negativo na capacidade catalítica das mesmas.

Os efeitos das diferentes fontes de selênio considerando doses utilizadas podem ser verificados na Figura 2. Nessa representação gráfica dos efeitos da

interação das fontes e doses de Se no poder germinativo das sementes de soja, observa-se o maior efeito fitotóxico do selenito de sódio em comparação com o selenato à medida que as doses de Se são incrementadas.

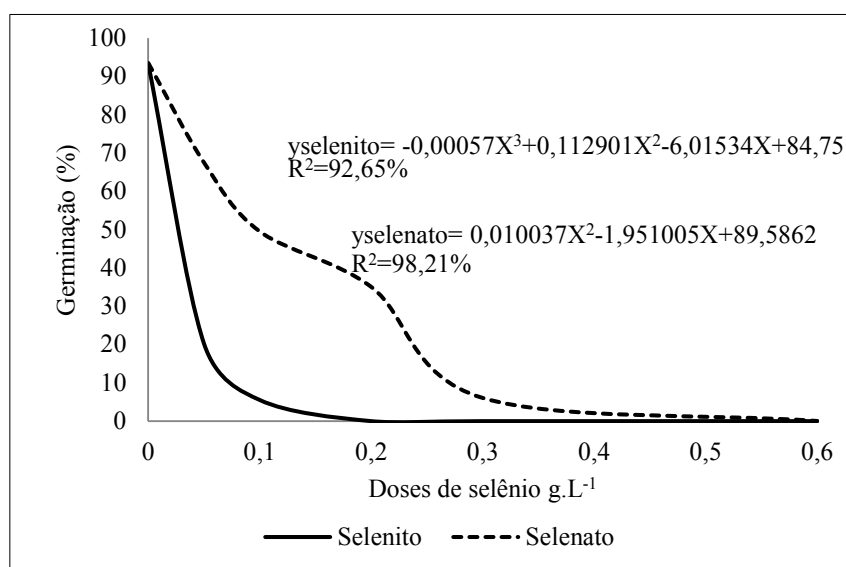


Figura 2 Efeitos da interação de fontes de Se (Na_2SeO_3 e Na_2SeO_4) com 6 doses de Se (0; 0,05; 0,1; 0,2; 0,3; 0,6 g. L^{-1} de selênio em água); no poder germinativo das sementes de soja no experimento. Influência da biofortificação agrônômica com selênio na germinação de sementes de soja.

Verifica-se que o poder germinativo foi totalmente inibido com a dose aproximada de 0,2 g.L^{-1} de selênio com a fonte selenito, enquanto que, para a fonte de selenato, o processo fitotóxico foi menos intenso no início e chegou ao seu máximo de inibição em torno de 0,5 g.L^{-1} de selênio. Verifica-se que para as duas fontes de Se, o efeito fitotóxico é altamente significativo na germinação das sementes de soja (Figura 2).

Para a interação cultivares e doses de Se, observa-se que a cultivar BRS Favorita RR manteve uma tolerância superior do que a cultivar Pioneer P98Y11

RR, à medida que as doses de selênio eram incrementadas. As duas cultivares, no entanto, tiveram um comportamento muito semelhante em relação ao efeito fitotóxico e à diminuição do poder germinativo (Figura 3).

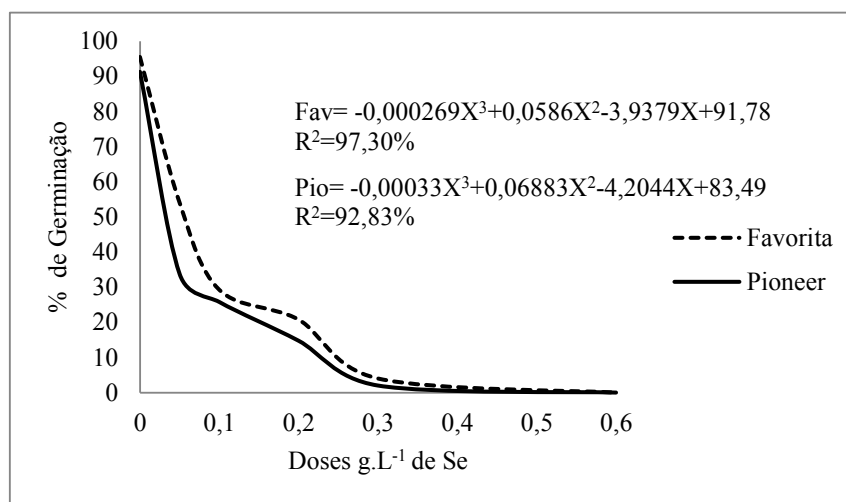


Figura 3 Efeitos da interação de duas cultivares de soja (EMBRAPA BRS Favorita RR e Pioneer P98Y11 RR), com seis doses de selênio (0; 0,05; 0,1; 0,2; 0,3; 0,6 g. L⁻¹) em água no experimento. Influência da biofortificação agrônômica com selênio na germinação de sementes de soja.

O poder germinativo chegou próximo de 0% na dose de 0,4 g.L⁻¹ para a cultivar Pioneer P98Y11 RR e próximo de 0,5 g.L⁻¹ para a cultivar BRS Favorita RR. Verifica-se uma capacidade diferenciada de resposta à fitotoxidez entre as cultivares podendo deduzir diferenças genéticas significativas em relação à resposta a níveis diferentes de selênio entre essas cultivares.

Na interação tripla (fontes, cultivares e doses), observa-se o comportamento bem diferenciado no poder germinativo das sementes. Verifica-se que o efeito fitotóxico do selenito é significativamente maior do que o efeito ocasionado pelo selenato (Figura 4).

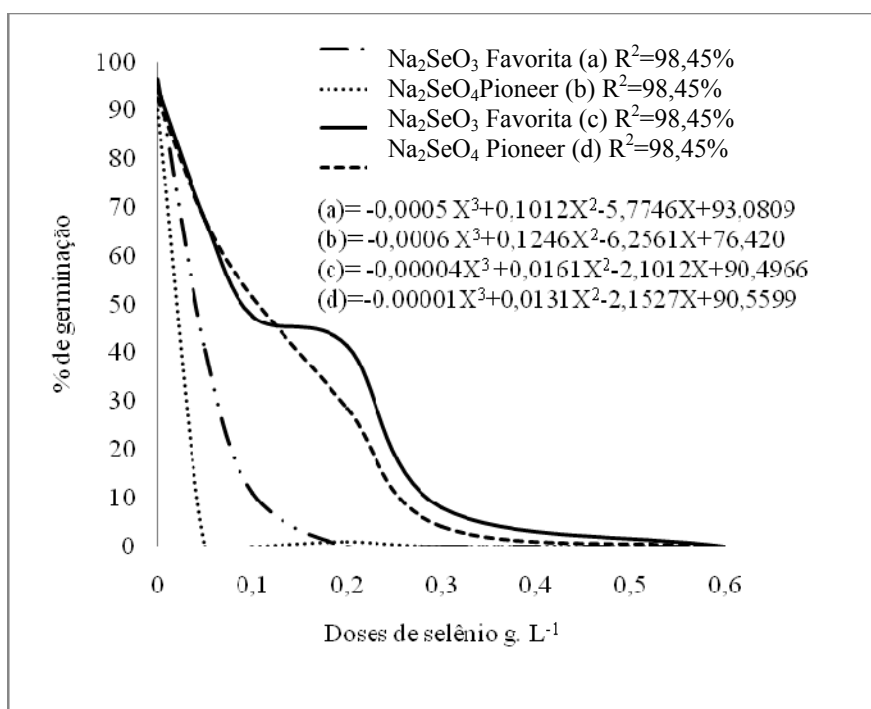


Figura 4 Efeitos da interação de duas cultivares de soja (EMBRAPA BRS Favorita RR e Pioneer P98Y11 RR), duas fontes de Se (Na₂SeO₃ e Na₂SeO₄) com seis doses de selênio (0; 0,05; 0,1; 0,2; 0,3; 0,6 g. L⁻¹) em água no experimento. Influência da biofortificação agrônômica com selênio na germinação de sementes de soja.

Observa-se também que o efeito fitotóxico do selenato foi menor nas duas cultivares e ao mesmo tempo esse efeito foi muito semelhante entre elas. Para a fonte selenito, o efeito fitotóxico na cultivar Pioneer P98Y11 RR foi significativamente maior do que para a cultivar BRS Favorita RR. Com níveis de 0,05 e 0,2 g.L⁻¹ de selênio para a fonte de selenito, já tinham se atingido níveis de 0% de germinação para as cultivares Pioneer P98Y11 RR e BRS Favorita RR, respectivamente, enquanto que para o selenato, esses níveis de

germinação foram atingidos com as doses de $0,6 \text{ g.L}^{-1}$ nas duas cultivares praticamente (Figura 4).

Como mencionado anteriormente, a margem de concentração para ocasionar toxidez nas plantas é dependente da forma de selênio acumulado. Das formas disponíveis de selênio, o selenato e o selenito são bastante tóxicas porque essas formas são prontamente absorvidas pelas plantas e são prontamente assimiladas em formas orgânicas de Se (TERRY et al., 2000).

Trabalhos similares indicam também que a forma de selenato é menos tóxica do que o selenito (RIOS et al., 2008). Além do processo fitotóxico mencionado, Rios et al. (2008) indicam que a aplicação de selênio na cultura da alface promoveu uma alta concentração de H_2O_2 e assim uma maior indução à peroxidação lipídica quando usado selenito de sódio.

Gomes-Junior et al. (2007 citado por RIOS et al., 2008) indicam que, em uma suspensão de células de café, a aplicação de selenito em baixas concentrações (0,05mM) produziu peroxidação lipídica e alterações das enzimas antioxidativas.

Esses processos fitotóxicos e pro-oxidativos podem ter sido, conjuntamente com as formas de selênio, assimiladas nas proteínas, as principais causas da ocorrência da diminuição drástica no processo germinativo dos grãos de soja nesse trabalho.

4 CONCLUSÕES

Há efeito fitotóxico do Se para processos de biofortificação agrônômica quando se utiliza esse elemento na forma aplicada via sementes.

O efeito fitotóxico do selênio reduz o poder germinativo das sementes de soja.

REFERÊNCIAS

BRASIL. Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento. **Regras para análise de sementes**. Brasília, 2009. 395 p.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira**: grãos, quarto levantamento. 2013. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/13_07_09_09_04_53_boletim_graos_junho__2013.pdf>. Acesso em: 10 jul. 2013.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**. Lavras, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, nov./dez. 2011.

GUIMARÃES, M. A.; DIAS, D. F. S; LOUREIRO, M. E. Hidratação de sementes. **Revista Trópica: ciências agrárias e biológicas**, Chapadinha, v. 2, n. 1, p. 31-39, 2008.

RAMALHO, M. A. P. et al. **Aplicações da genética quantitativa no melhoramento de plantas utógamas**. 1. ed. Lavras: UFLA, 2012. 522 p.

RAMOS, S. J. et al. Selenium accumulation in lettuce germplasm. **Planta**, Berlin, v. 233, n. 4, p. 649-660, Dec. 2011.

RESENDE, M. D. V. **Genética biométrica e estatística no melhoramento de plantas perenes**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2002. 975 p.

RESENDE, M. D. V.; DUARTE, J. B. Precisão e controle de qualidade em experimentos de avaliação de cultivares. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 37, n. 3, p. 182-194, set. 2007.

RIOS, J. J. et al. Biofortification of Se and induction of the antioxidant capacity in lettuce plants. **Scientia Horticulturae**, Amsterdam, v. 116, n. 3, p. 248-255, May 2008. Disponível em:
<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304423808000113>>.
Acesso em: 10 jan. 2013.

SCOTT, A.; KNOTT, M. Cluster-analysis method for grouping means in analysis of variance. **Biometrics**, Washington, v. 30, n. 3, p. 507-512, Sept. 1974.

SORS, T. G.; ELLIS, D. R.; SALT, D. E. Selenium uptake, translocation assimilation and metabolic fate in plants. **Photosynthesis Research**, Dordrecht, v. 86, n. 3, p. 373-389, Dec. 2005. Disponível em:
<<http://link.springer.com/article/10.1007/s11120-005-5222-9>>. Acesso em: 10 jan. 2013.

TERRY, N. et al. Selenium in higher plants. **Annual Review Plant Physiology Plant Molecular Biology**, v. 51, p. 401-432, 2000. Disponível em:
<http://www.plantstress.com/articles/toxicity_i/selenium.pdf>. Acesso em: 1 maio 2013.

ZHU, Y. G. et al. Selenium in higher plants: understanding mechanisms for biofortification and phytoremediation. **Trends in Plant Science**, Oxford, v. 14, n. 8, p. 436-442, Aug. 2009. Disponível em:
<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1360138509001708>>.
Acesso em: 1 maio 2013.