



PAULO FERNANDES BOLDRIN

**BIOFORTIFICAÇÃO AGRONÔMICA COM
SELÊNIO EM ARROZ**

**LAVRAS – MG
2011**

PAULO FERNANDES BOLDRIN

BIOFORTIFICAÇÃO AGRONÔMICA COM SELÊNIO EM ARROZ

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, área de concentração em Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas, para a obtenção do título de Mestre.

Orientador
Dr. Valdemar Faquin

**LAVRAS – MG
2011**

**Ficha Catalográfica Preparada pela Divisão de Processos Técnicos da
Biblioteca da UFLA**

Boldrin, Paulo Fernandes.

Biofortificação agronômica com selênio em arroz / Paulo
Fernandes Boldrin. – Lavras : UFLA, 2011.

63 p. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Lavras, 2011.

Orientador: Valdemar Faquin.

Bibliografia.

1. Adubação. 2. Selenato. 3. Selenito. 4. Selênio. 5. *Oriza sativa*
L. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 631.8

PAULO FERNANDES BOLDRIN

BIOFORTIFICAÇÃO AGRONÔMICA COM SELÊNIO EM ARROZ

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, área de concentração em Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 30 de setembro de 2011.

PhD. Luiz Roberto Guimarães Guilherme UFLA

Dr. Joelma Perreira UFLA

Dr. Valdemar Faquin
Orientador

Coorientador
Dr. Sílvio Júnio Ramos

**LAVRAS – MG
2011**

*Aos meus pais,
José Boldrin e Marli.*

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por sempre ter estado presente em minha vida guiando, todos os meus passos.

À Universidade Federal de Lavras (UFLA), e ao Departamento de Ciência do Solo (DCS) / UFLA, pela realização do curso.

Ao Professor Valdemar Faquin, por todos os ensinamentos, conselhos, orientações, que com certeza contribuiu muito para minha formação profissional e pessoal.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudo.

Ao Sílvio Júnio Ramos, pela coorientação na elaboração e condução dos trabalhos, e pela grande contribuição à minha formação.

Aos técnicos e funcionários do DCS/UFLA, em especial ao Roberto por sempre ter estado pronto para ajudar-me, profissional que certamente terei como exemplo de competência e honestidade para ser seguido.

À Carla Elisa, Fabrício Ávila, Nilma Portela, Geila Carvalho, Enio Tarso, Andressa por toda ajuda na condução e análises do experimento.

A todos os colegas do departamento, ao Walbert e o Bruno por todos os conhecimentos compartilhados.

Aos meus Pais, familiares, minhas irmãs Roberta e Mariana, meus cunhados Jémerson e Daniel por todos os ensinamentos, virtudes e pela confiança que sempre depositaram em mim, por serem a minha base e refúgio.

À Karina por todo apoio, amor, companheirismo.

RESUMO

O selênio (Se) é considerado essencial para humanos e animais por fazer parte de uma série de reações químicas e possuir propriedades antioxidantes. Dietas deficientes em Se estão associadas com problemas de saúde. Sendo assim, espera-se com a biofortificação com Se, minimizar os problemas relacionados a essas deficiências, e a escolha de culturas amplamente consumidas pela população, também auxilia nesse sentido. No presente estudo foram realizados dois experimentos. O primeiro, para avaliar o efeito de doses de selenato e selenito, aplicadas no solo, na biofortificação com Se, no crescimento e produção de plantas de arroz, na eficiência das raízes na absorção de Se, no aproveitamento do Se aplicado, além de verificar a influência dessas fontes de Se nos teores de P, S, Fe e Zn nos grãos de arroz. No segundo experimento, compararam-se formas de aplicação (via solo e foliar) e fontes de Se (selenato e selenito) no crescimento, produção de grãos, teor e acúmulo de Se, bem como nos teores de N, P, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn e Zn nos grãos de arroz. Os experimentos foram conduzidos em casa de vegetação utilizando-se vasos com 4 dm³ de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, textura média, com duas plantas por vaso. Os delineamentos experimentais foram inteiramente casualizados. O primeiro experimento constou de um esquema fatorial 5 × 2, sendo cinco doses de Se (0; 0,75; 1,50; 3,0; 6,0 mg dm⁻³) e duas fontes de Se (selenato de sódio e selenito de sódio), com cinco repetições. O segundo experimento utilizou o esquema fatorial 2 × 2 × 2, sendo: com e sem aplicação de Se; dois modos de aplicação de Se (via solo na dose de 0,75 mg dm⁻³ e foliar na concentração de 50 mmol L⁻¹) e duas fontes de Se (selenato de sódio e selenito de sódio), com cinco repetições. No primeiro experimento, o selenato proporcionou maior eficiência na sua absorção pelas raízes, aproveitamento pela planta, translocação para a parte aérea e teor desse elemento nos grãos. A biofortificação agronômica com Se em arroz foi melhor alcançada na dose de 0,75 mg dm⁻³ ao se utilizar o selenito, ou doses menores ao se utilizar o selenato. A aplicação de Se junto à adubação influenciou os teores de P, S, Fe e Zn nos grãos do arroz. No segundo experimento, verificou-se que o selenato aumentou a produção de massa seca e, ambas as fontes de Se, via foliar, aumentaram a produção de grãos. A aplicação de Se, tanto foliar quanto via solo, promoveu aumentos nos seus teores nos grãos do arroz, sendo a via solo mais efetiva. Os teores dos macros e micronutrientes nos grãos do arroz foram influenciados pela forma de aplicação e fontes de Se. É possível aumentar o teor de Se em arroz, com o uso de selenato e selenito na adubação, para minimizar a deficiência desse elemento na população humana.

Palavras-chave: Selenato. Selenito. *Oryza sativa* L.. Adubação foliar. Adubação via solo.

ABSTRACT

Selenium (Se) is a chemical element considered essential for humans and animals to be part of a chemical reactions series and to possess antioxidant properties. Deficient diets in selenium are associated with health problems. Therefore, biofortification with Se is a hope to minimize the problems related to these deficiencies, and in this regard, the choice of crops largely consumed by population also helps. Two experiments were carried out in this study. The first one was to evaluate the effect of selenite and selenate doses applied in soil, in biofortification with Se in rice plants growth and yield, in the root efficiency in Se uptake, in the Se use, besides to checking these sources influence in the levels of P, S, Fe and Zn in rice grains. In the second experiment, we compared application forms (soil and foliar) and Se sources (selenate and selenite) on growth, grain production, Se content and accumulation, as well as content of N, P, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn and Zn in rice grains. The experiments were conducted in a greenhouse using pots with 4 dm³ of a Red-Yellow Latosol, medium texture, with two plants per pot. The experimental designs were completely randomized. The first experiment consisted of a 5 × 2 factorial scheme, with five Se doses (0, 0.75, 1.50, 3.0, 6.0 mg dm⁻³) and two Se sources (sodium selenate and sodium selenite), with five replicates. The second experiment used the factorial 2 × 2 × 2, as follows: with and without Se application, two Se application forms (dose of 0.75 mg dm⁻³ in the soil and 50 mmol L⁻¹ in foliar application) and two Se sources (sodium selenate and sodium selenite), with five replicates. In the first experiment, Se applied in selenate form provided greater efficiency in their absorption by the roots, plant use, translocation to the shoot and Se content in the grain. It was found that Se agronomic biofortification in rice was best achieved at a dose 0.75 mg dm⁻³ when using selenite form or smaller doses when using selenate. It was noted that Se application combined to the fertilization influenced the P, S, Fe and Zn levels in the rice grains. In the second experiment, we found that the Se application as selenate in the soil increased the dry matter production, and both Se sources in foliar form, increased grain production. Both Se application forms (soil and foliar) promoted increases in their levels in rice grains, being the soil application form the most effective one. As observed in the first experiment, macro and micronutrients contents in rice grain were influenced by application forms and Se sources. This study results show that it is possible to increase Se content in rice, with selenite and selenate use in fertilizers to minimize this element deficiency in the human population.

Keywords: Selenate. Selenite. *Oryza sativa* L.. Foliar fertilization. Fertilizing the soil.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – Introdução Geral	9
1 INTRODUÇÃO	9
2 REFERENCIAL TEÓRICO	11
2.1 Particularidades do arroz	11
2.2 Ocorrência e características do selênio	12
2.3 Adubação com selênio	13
2.4 Efeito do selênio nas plantas	16
REFERÊNCIAS	20
CAPÍTULO 2 - Biofortificação Agronômica com Selênio em Arroz Adubado com Selenato e Selenito	26
1 INTRODUÇÃO	29
2 MATERIAL E MÉTODOS	30
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
4 CONCLUSÕES	39
REFERÊNCIAS	40
CAPÍTULO 3 - Formas de Aplicação e Fontes de Selênio na Biofortificação do Arroz	43
1 INTRODUÇÃO	46
2 MATERIAL E MÉTODOS	47
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
4 CONCLUSÕES	58
REFERÊNCIAS	59

CAPÍTULO 1 - Introdução Geral

1 INTRODUÇÃO

O Selênio (Se) é considerado essencial para a alimentação animal e humana desde 1957, por ser componente da enzima glutathione peroxidase e de algumas selenoproteínas (RAYMAN, 2002). A necessidade humana de ingestão de Se é de 50-70 $\mu\text{g dia}^{-1}$ (UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE - USDA, 2003). No entanto, em contraste com os seres humanos e animais, o Se para as plantas ainda não é considerado essencial (PILON-SMITS; QUINN, 2010). Apesar disso, há relatos na literatura que esse elemento participa de alguns compostos ou de algumas reações nas plantas e alguns estudos relatam efeitos benéficos do Se, por aumentar a atividade antioxidante, levando a uma maior produção vegetal (HARTIKAINEN; XUE; PIIRONEN, 2000; RÍOS et al., 2008).

Alguns estudos revelam que um suplemento dietético com selênio próximo de 100 $\mu\text{g dia}^{-1}$ resulta em uma diminuição da incidência de câncer no pulmão e próstata em humanos (CLARK et al., 1996; IP et al., 1991). O Se é necessário para o perfeito funcionamento do sistema fisiológico do corpo humano. Segundo Pedrero, Madrid e Câmara (2006), uma dieta deficiente em Se é causada pela ingestão de alimentos vegetais com uma concentração imperceptível desse elemento, devido à sua baixa biodisponibilidade na maioria dos solos e culturas. Por esse motivo e pelo papel das plantas como a principal fonte desse elemento, vários estudos têm surgido em diversas partes do planeta visando aumentar o teor de Se nas culturas agrícolas, para posterior consumo humano.

No Brasil, trabalhos desta natureza são escassos, existindo ainda um indicativo de baixo consumo de Se pela população (MAIHARA et al., 2004).

Desta forma, é importante manter-se atento à possibilidade de deficiências de Se.

A técnica da biofortificação com Se consiste no aumento da concentração desse elemento nas culturas agrícolas, através da sua introdução na adubação ou por melhoramento genético, visando atender à necessidade humana ou animal (RÍOS et al., 2008). Ressalta-se que, em programas de biofortificação com Se, deve-se levar em conta a forma de Se aplicada, uma vez que os solos intemperizados, com elevadas concentrações de óxidos de Fe e Al na fração argila, podem adsorver o selenito, reduzindo, conseqüentemente, a disponibilidade de Se para as plantas (ZHANG; SPARKS, 1990). Nesse sentido, Mouta et al. (2008) verificaram que o Se na forma de selenito apresentou grande imobilização em Latossolos do Brasil.

A escolha de culturas agrícolas cujos produtos são amplamente consumidas pela população, possibilita maior sucesso nos programas de biofortificação. Nesse sentido, o arroz sendo alimento básico predominante em pelo menos 33 países (LUCCA; POLETTI; SAUTTIER, 2006) apresenta enorme potencial para estudos com Se visando diminuir a deficiência desse elemento na população mundial.

Nesse contexto, devido à importância do arroz na alimentação humana, associada à escassez de informações envolvendo a biofortificação agrônômica com Se no Brasil, objetivou-se, neste trabalho avaliar o efeito da aplicação de doses de selenato e selenito no solo, bem como verificar efeito dessas fontes em diferentes formas de aplicação (foliar e solo), na produção e biofortificação do arroz com Se.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Particularidades do arroz

O arroz (*Oryza sativa* L.) é uma monocotiledônea da família *Poaceae*, com ampla adaptabilidade a diferentes condições de clima e solo. Apresenta sistema radicular fasciculado, caules redondos e ocos, com folhas sésseis, limbo foliar plano e inflorescência terminal em forma de panículas. Apesar dos primeiros registros de cultivo serem de uma forma perene, o arroz cultivado atualmente tem um ciclo de características anuais. No entanto, a exploração econômica da soca é possível e há relatos dessa prática por alguns produtores (SOARES, 2005).

Essa espécie vem sendo cultivada há muito tempo, tendo seu registro de utilização por diferentes povos, o que dificulta, atualmente, definir a origem da espécie. Porém, é aceito que o arroz possui dois centros de origem, o Sudoeste Asiático (o principal) e o Africano (Secundário) (SOARES, 2005).

O arroz, um dos cereais mais consumidos, tem papel importante na alimentação mundial (LUCCA; POLETTI; SAUTTIER, 2006). Juntamente com o feijão, o arroz faz parte da dieta básica da população brasileira. É responsável por 24,2% do total de calorias e 17,9% das proteínas consumidas no país (SOARES, 2005). Villar (2002) definiu padrões de consumo de arroz em três modelos. O modelo asiático corresponde a um consumo médio, per capita, superior a 100 kg ao ano. O modelo subtropical apresenta consumo médio de 35 a 65 kg ao ano, tendo o Brasil um consumo anual de arroz em torno de 42 kg por habitante / ano.

Segundo Santos, Stone e Vieira (2006), a cultura do arroz apresenta potencialidade de aumento na produção, com conseqüente destaque no combate à fome no mundo. Kennedy e Burlingame (2003) relataram que o arroz tem sido

considerado um dos alimentos com melhor balanceamento nutricional, pois fornece 20% de energia alimentar e 15% de proteína per capita no consumo mundial necessário ao homem.

A escolha dessa cultura para a realização da atual pesquisa, visa, através dos programas de biofortificação com Se, melhorar a qualidade nutricional do arroz para a população.

2.2 Ocorrência e características do selênio

O Se é um elemento não metal, da família VI A (calcogênios), foi descoberto em 1817 por um químico sueco Jöns Jacob Berzelius.

Esse elemento pode ser originado de fontes naturais (processos geofísicos e biológicos) e fontes antropogênicas (processos industriais e agricultura) sendo as primeiras, provavelmente, as responsáveis pela presença de Se no solo, enquanto as demais são responsáveis pela redistribuição desse elemento no ambiente (ENVIRONMENTAL HEALTH CRITERIA - EHC, 1987).

No ambiente, o Se pode existir nas formas inorgânicas (como Se elementar, íons de selenato e selenito, etc) e formas orgânicas (compostos metilados, seleno-aminoácidos, selenoproteínas e seus derivados) ou como dióxido de Se nas cinzas provenientes da calcinação de minérios de sulfetos (FISHBEINS, 1991).

O papel do Se na nutrição humana e animal é bem conhecido. Sabe-se hoje que o Se é capaz de desempenhar certas funções atribuídas à vitamina E, que é um poderoso antioxidante e atua prevenindo a formação de peróxidos (FAIRWEATHER-TAIT et al., 2011). Estudos visando esclarecer essa relação indicaram que o Se é componente da peroxidase da glutathione, cuja ação seria controlar o nível de peróxido formado no metabolismo animal; função essa

desempenhada originalmente pela vitamina E (FAIRWEATHER-TAIT et al., 2011; RAYMAN, 2002).

Para humanos e animais, as plantas são as maiores fontes de Se, na maioria dos países. O teor de Se nos alimentos depende do teor desse elemento no solo onde são cultivados ou onde os animais são criados (COMBS, 2001). Pode ser encontrado naturalmente nos alimentos de origem animal, frutos do mar, carnes, vísceras, grãos vegetais, sendo a castanha-do-Brasil o alimento mais rico nesse mineral (SOUZA; MENEZES, 2004). Estudos com Se no desenvolvimento humano e animal levaram ao reconhecimento de que na Europa, Ásia e América não fornecem esse elemento em níveis suficientes para a alimentação; e as deficiências têm sido relatadas em muitos países (COMBS, 2001). A utilização de suplementos vitamínicos contendo Se por humanos é eficaz para fornecer as quantidades diárias de ingestão desse nutriente, porém o consumo desses suplementos é ineficiente para atender à população como um todo, devido ao seu baixo poder aquisitivo, e a não funcionalidade do consumo de Se em cápsulas. Ressaltando a potencialidade dos programas de biofortificação agrônômica com Se.

2.3 Adubação com selênio

O avanço das pesquisas na agricultura nas décadas de 1990 e 2000 representa importantes progressos no desenvolvimento da humanidade. A obtenção de variedades de porte baixo, melhoradas para responder à adubação, permitiu alcançar altas produtividades. Desse modo, conseguiu-se suprir a demanda por alimentos decorrente do crescimento populacional, ressaltando-se os contínuos avanços nesse sentido.

Embora a produção de alimentos tenha acompanhado o crescimento populacional, problemas de deficiência nutricional atingem quase metade da

população mundial, especialmente mulheres grávidas, adolescentes e crianças (GRAHAM et al., 2007). Isso se deve, em parte, ao melhoramento genético vegetal voltado para ganhos em produtividade sem considerar melhoria na qualidade, principalmente nos aspectos nutricionais dos produtos. Trabalho realizado por Garvin, Welch e Finley (2006) demonstrou que, ao longo dos anos, o aumento de produtividade obtido por intermédio do melhoramento vegetal apresentou relação inversa ao teor de Se nos alimentos.

Segundo Dibb, Roberts e Welch (2005), cerca de 852 milhões de pessoas, aproximadamente 13% da população mundial, encontravam-se subnutridas entre os anos 2000 e 2006, sendo que 96% destas encontravam-se em países em desenvolvimento. As deficiências ocasionadas pela falta de ferro, iodo, selênio, vitamina A e zinco são atualmente as que causam maior preocupação em relação à saúde humana e de animais, principalmente nos países em desenvolvimento (WHITE; BROADLEY, 2009).

Diante das evidências em relação à baixa ingestão de Se por grande parte da população mundial e, considerando-se os possíveis benefícios que a ingestão desse nutriente pode trazer à saúde humana, estratégias têm sido desenvolvidas para possibilitar o incremento do Se em níveis considerados nutricionalmente adequados. Dentre as estratégias atualmente utilizadas, a adubação de plantas com sais de Se, prática agrônômica denominada biofortificação, vem sendo amplamente difundida no mundo. Entretanto, tais estudos no Brasil com Se são ainda pouco expressivos. A esse fato, soma-se que focos de deficiência de Se têm sido identificados em várias regiões do Brasil (BOAVENTURA; COZZOLINO, 1993; MAIHARA et al., 2004; MORAES; TOKARNIA; DOBEREINER, 1999), tornando indispensáveis estudos com a biofortificação com Se nas culturas agrícolas.

A adição do Se aos fertilizantes é praticada, principalmente na Ásia, Europa e Oceania. O melhor exemplo da biofortificação com Se é o promovido

pela Finlândia, que teve início em 1984, em que esse elemento é normalmente adicionado à mistura de NPK, na forma de selenato de sódio ou potássio. De acordo com Aro, Alfthan e Varo (1995) a experiência finlandesa tem-se caracterizado como prática segura na fertilização de culturas com Se, de baixo custo, fácil execução e muito eficaz na elevação do nível de Se na população. Esses autores relatam que, nos três anos após o início do programa, a ingestão dietética de Se triplicou e a concentração do nutriente no plasma sanguíneo quase duplicou. Também tem-se observado, a partir de 1985, decréscimo na taxa de doenças cardiovasculares e de certos tipos de câncer.

Segundo Hartikainen (2005), a técnica da biofortificação com Se nas plantas é ideal para inserir esse elemento na cadeia alimentar, uma vez que as plantas atuam de forma eficiente no controle da ingestão excessiva e, ou, acidental, que pode ocorrer em humanos pelo uso de suplementos alimentares contendo Se. Também as plantas são capazes de acumular os micronutrientes de uma forma não tóxica nas partes comestíveis, podendo disponibilizá-los de forma melhor biodisponível para animais e humanos (FAIRWEATHER-TAIT; HURRELL, 1996; WELCH, 2001). De acordo com Graham et al. (2007), a biofortificação por meio da introdução de Se na adubação apresenta potencial para fornecer benefícios contínuos, ano após ano, a um custo inferior ao uso de suplementos alimentares e da fortificação de produtos pós-colheita nas indústrias.

Hu et al. (2002), em um experimento realizado para avaliar métodos de aplicação de Se na biofortificação do arroz, utilizando um fertilizante enriquecido com Se, aplicado no solo e via aplicação foliar, verificaram que não houve diferença significativa na produção de grãos da cultura, nas diferentes formas de aplicação de Se. Entretanto, os autores verificaram que os métodos de aplicação do Se proporcionaram aumento considerável no seu teor nos grãos. Os autores ainda sugerem que o arroz enriquecido com Se, em uma população que

tem o consumo médio de arroz em 350 g dia^{-1} por pessoa, pode aumentar a absorção de Se em humanos em mais de $100 \mu\text{g dia}^{-1}$, diminuindo, dessa forma, o risco de doenças cardiovasculares.

Em estudo realizado por Euliss e Carmichael (2004), verificou-se, na cultura da colza (*Brassica napus* L.), uma pequena redução na produção dessa cultura quando se aplicou 2 mg L^{-1} de Se, na forma de selenito. Entretanto, os autores verificaram considerável aumento no teor de óleo na semente, o que poderia ser usado potencialmente como suplemento na dieta humana, chegando a diminuir, efetivamente, as taxas de certos tipos de câncer.

2.4 Efeito do selênio nas plantas

Em contraste com os seres humanos e animais, o Se para as plantas não é considerado essencial (PILON-SMITS; QUINN, 2010; SORS; ELLIS; SALT, 2005). Cientificamente, o primeiro efeito positivo do Se no crescimento das plantas foi relatado por Singh, Singh e Bhandari (1980), que demonstrou que a aplicação no solo de $0,5 \text{ mg kg}^{-1}$ de Se na forma de selenito estimulou o crescimento e o rendimento da matéria seca da mostarda indiana (*Brassica juncea* L.). Mais recentemente, foi revelado que o Se aplicado em baixas concentrações proporciona aumento no crescimento e na capacidade antioxidante de mono e dicotiledôneas. O aumento de crescimento em resposta à aplicação de Se foi demonstrada em alface e azevém (HARTIKAINEN et al., 1997; HARTIKAINEN; XUE, 1999) e na soja (DJANAGUIRAMAN et al., 2005). A adição em baixas concentrações de Se amenizou o estresse oxidativo causado pela radiação ultravioleta em alface e azevém (HARTIKAINEN; XUE, 1999) e no morangueiro (VALKAMA et al., 2003). Além disso, um nível adequado de Se foi capaz de aumentar a capacidade antioxidante e também levou ao atraso na senescência nas folhas da alface, azevém (XUE;

HARTIKAINEN; PIIRONEN, 2001) e da soja (DJANAGUIRAMAN et al., 2005). Outros trabalhos indicam que a adição de Se aumenta a atividade da catalase, superóxido dismutase e glutathiona peroxidase (HARTIKAINEN et al., 2000; HARTIKAINEN; XUE, 1999; PENNANEN; XUE; HARTIKAINEN, 2002; XUE; HARTIKAINEN, 2000; XUE; HARTIKAINEN; PIIRONEN, 2001).

Segundo Allaway (1973), todas as plantas absorvem Se do solo. No entanto, a capacidade pode variar em função da espécie, estágio de crescimento e fatores biogeoquímicos, que influenciam na disponibilidade do Se no solo, onde essa é controlada pela especiação do elemento na solução do solo. A absorção através de plantas depende da forma química e solubilidade do Se, como também da umidade no solo.

A forma de Se aplicada deve ser levada em conta nas adubações. Segundo Rovira et al. (2008), o Se na forma de selenito pode sofrer adsorção específica com a hematita e goethita, formando complexos de esfera-interna, o que pode torná-lo indisponível para as plantas. O mesmo não ocorre com o Se na forma de selenato, que é estável em ambientes oxidados, sendo muito móvel em solos, estando prontamente disponível para as plantas.

O mecanismo para a absorção do selenato pelas plantas tem sido bem estabelecido (Figura 1). O selenato é absorvido pelas raízes das plantas por transportadores do sulfato, apesar de diferentes espécies vegetais apresentarem diferentes seletividades entre o sulfato x selenato (BELL; PARKER; PAGE, 1992; TERRY et al., 2000). Em contrapartida, pouco se sabe sobre os mecanismos envolvidos na absorção de selenito pelas plantas. Foi sugerido que o selenito é absorvido pelas raízes através da difusão passiva (ARVY, 1993; LI; MCGRATH; ZHAO, 2008). Além das diferenças nos mecanismos de absorção, o selenato e selenito também diferem na sua mobilidade no interior das plantas. Nesse sentido, estudos relatam que o selenato é facilmente distribuído a partir de

raízes para a parte aérea, enquanto o selenito ou seus produtos metabólicos tende a se acumular nas raízes (ZHANG et al., 2003). A razão pela qual menor quantidade de selenito é translocado para a parte aérea está relacionada à conversão mais rápida em formas orgânicas de Se, como selenometionina (ZAYED; LYTLE; TERRY, 1998), que são retidas nas raízes. Outra diferença entre essas formas de Se pode ser observada no acúmulo de nutrientes. O selenito, por estar mais acumulado nas raízes, exerce maior efeito sobre as membranas protoplasmáticas e, finalmente, nos processos metabólicos das células. Possivelmente, os íons de selenito alteram o coeficiente de permeabilidade dos íons na membrana plasmática e, portanto, afetam o transporte iônico nas células vegetais (PAZURKIEWICZ-KOCOT; KITA; PIETRUSKA, 2008).

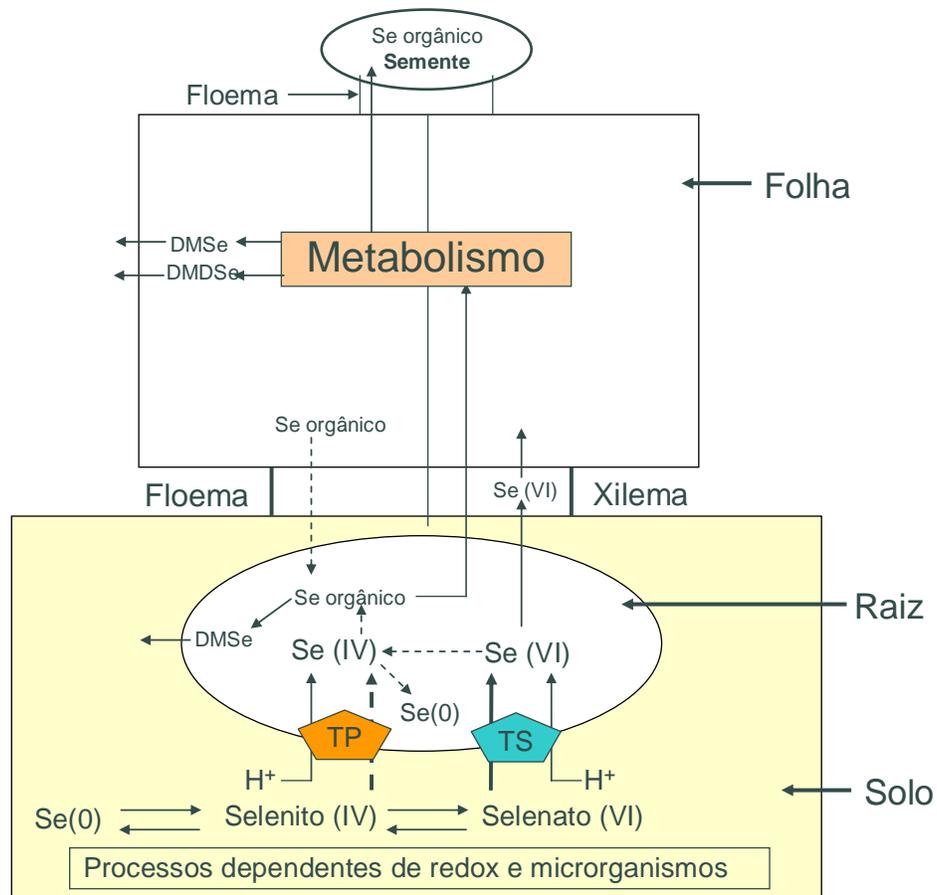


Figura 1 Selênio no solo, absorção, traslocação e metabolismo em plantas.
 Abreviaturas: TP = transportadores de sulfato, TS = transportadores de sulfato, DMSe = di-metil seleneto, DMDSe = di-metil di-seleneto
 Fonte: Zhu et al. (2009)

REFERÊNCIAS

ALLAWAY, A. Selenium in the food chain. **The Cornell Veterinarian**, Ithaca, v. 63, p. 151-170, 1973.

ARO, A.; ALFTHAN, G.; VARO, P. Effects of supplementation of fertilizers on human selenium status in Finland. **Analyst**, Cambridge, v. 120, n. 3, p. 841-843, Feb. 1995.

ARVY, M. P. Selenate and selenite uptake and translocation in bean plants (*Phaseolus vulgaris*). **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 44, n. 6, p. 1083-1087, June 1993.

BELL, P. F.; PARKER, D. R.; PAGE, A. L. Contrasting selenate sulfate interations in selenium-accumulating and nonaccumulating plant species. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 56, n. 1, p. 1818-1824, 1992.

BOAVENTURA, G. T.; COZZOLINO, S. M. F. Selenium bioavailability in the regional urban diet of Mato Grosso, Brazil. **International Journal of Food Sciences and Nutrition**, Basingstoke, v. 43, n. 4, p. 223-229, Dec. 1993.

CLARK, L. C. et al. Effects of selenium supplementation for cancer prevention in patients with carcinoma of the skin: a randomized controlled trial. **Journal of American Medical Association**, Chicago, v. 276, n. 24, p. 1957-1963, Dec. 1996.

COMBS, G. F. Selenium in global food systems. **British Journal of Nutrition**, Crambridge, v. 85, n. 5, p. 517-547, May 2001.

DIBB, D. W.; ROBERTS, T. L.; WELCH, R. M. From quantity to quality: the importance of fertilizers in human nutrition. In: INTERNATIONAL PLANT NUTRITION COLLOQUIUM, 15., 2005, Beijing. **Proceedings...** Beijing: IPN, 2005. p. 20-25.

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.

ENVIRONMENTAL HEALTH CRITERIA. **Selenium**. Geneva: World Health Organization, 1987. 58 p.

EULISS, K. W.; CARMICHAEL, J. S. The effects of selenium accumulation in hydroponically grown canola (*Brassica napus*). **Biological & Biomedical Sciences**, North Dakota, v. 1, n. 10, p. 1-12, Jan. 2004.

FAIRWEATHER-TAIT, S. et al. Selenium in human health and disease. **Antioxidants & Redox Signaling**, New Rochelle, v. 14, n. 7, p. 1337-1383, Apr. 2011.

FAIRWEATHER-TAIT, S.; HURRELL, R. F. Bioavailability of minerals and trace elements. **Nutrition Research Reviews**, Cambridge, v. 9, n. 2, p. 295-324, Apr. 1996.

FISHBEIN, L. Selenium. In: MERIAN, E. (Ed.). **Metals and their compounds in the environment: occurrence, analysis and biological relevance**. New York: VHC Weinheim, 1991. p. 1153-1190.

GARVIN, D. F.; WELCH, R. M.; FINLEY, J. W. Historical shifts in the seed mineral micronutrient concentrations of US hard red winter wheat germplasm. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, London, v. 86, n. 13, p. 2213-2220, Oct. 2006.

GRAHAM, R. D. et al. Nutritious subsistence food systems. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 92, n. 1, p. 1-74, Mar. 2007.

HARTIKAINEN, H. Biogeochemistry of selenium and its impact on food chain quality and human health. **Journal of Trace Elements in Medicine and Biology**, Stuttgart, v. 18, n. 4, p. 309-318, June 2005.

HARTIKAINEN, H. et al. Quality of the ryegrass and lettuce yields as affected by selenium fertilization. **Agricultural and Food Science in Finland**, Jokioinen, v. 6, n. 3, p. 381-387, June 1997.

HARTIKAINEN, H.; XUE, T. The promotive effect of selenium on plant growth as triggered by ultraviolet irradiation. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 28, n. 4, p. 1372-1375, Aug. 1999.

HARTIKAINEN, H.; XUE, T.; PIIRONEN, V. Selenium as an anti-oxidant and pro-oxidant in ryegrass. **Plant and Soil**, The Hague, v. 225, n. 1, p. 193-200, Feb. 2000.

HU, Q. et al. Determination of selenium concentration in rice and effect of foliar application of Se-enriched fertilizer or sodium selenite on the selenium content

of rice. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, London, v. 82, n. 8, p. 869-872, June 2002.

IP, C. et al. Chemical form of Se, critical metabolites, and cancer prevention. **Cancer Research**, Baltimore, v. 51, n. 2, p. 595-600, Jan. 1991.

KENNEDY, G.; BURLINGAME, B. Analysis of food composition data on rice from a plant genetic resources perspective. **Food Chemistry**, Barking, v. 80, n. 4, p. 589-596, Apr. 2003.

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

LUCCA, P.; POLETTI, S.; SAUTTER, C. Genetic engineering approaches to enrich rice with iron and vitamin A. **Physiologia Plantarum**, Copenhagen, v. 126, n. 3, p. 291-303, Mar. 2006.

MAIHARA, V. A. et al. Daily dietary selenium intake of selected Brazilian population groups. **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**, Lousanne, v. 259, n. 3, p. 465-468, Mar. 2004.

MORAES, S. S.; TOKARNIA, C. H.; DOBEREINER, J. Microelement deficiencies and imbalances in cattle and sheep in some regions of Brazil. **Pesquisa Veterinária Brasileira**, Rio de Janeiro, v. 19, n. 1, p. 19-33, 1999.

MOUTA, E. R. et al. Adsorção de selênio em Latossolos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, n. 3, p. 1033-1041, maio/jun. 2008.

PAZURKIEWICZ-KOCOT, K.; KITA, A.; PIETRUSZKA, M. Effect of selenium on magnesium, iron, manganese, copper, and zinc accumulation in corn treated by indole-3-acetic acid. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 39, n. 15/16, p. 2303-2318, Aug. 2008.

PEDRERO, Z.; MADRID, Y.; CAMARA, C. Selenium species bioaccessibility in enriched radish (*Raphanus sativus*): a potential dietary source of selenium. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Easton, v. 54, n. 6, p. 2412-2417, Mar. 2006.

PENNANEN, A.; XUE, T.; HARTIKAINEN, H. Protective role of selenium in plant subjected to severe UV irradiation stress. **Journal of Applied Botany**, Berlin, v. 76, n. 1, p. 66-76, Jan. 2002.

PILON-SMITS, E.; QUINN, C. Selenium metabolism in plants. In: HELL, R.; MENDEL, R. R. (Ed.). **Cell biology of metal and nutrients**. Berlin: Springer, 2010. p. 225-241.

RAYMAN, M. P. The argument for increasing selenium intake. **Proceedings of the Nutrition Society**, Cambridge, v. 61, n. 2, p. 203-215, Apr. 2002.

RÍOS, 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.

ROVIRA, M. et al. Sorption of selenium (IV) and selenium (VI) onto natural iron oxides: goethite and hematite. **Journal of Hazardous Materials**, Amsterdam, v. 150, n. 2, p. 279-284, Jan. 2008.

SANTOS, A. B.; STONE, L. F.; VIEIRA, N. R. A. **A cultura do arroz no Brasil**. 2. ed. Santo Antônio de Goiás: EMBRAPA Arroz e Feijão, 2006. 1118 p.

SINGH, M.; SINGH, H.; BHANDARI, D. K. Interaction of selenium and sulphur on the growth and chemical composition of raya. **Soil Science**, Baltimore, v. 129, n. 2, p. 238-244, 1980.

SOARES, A. A. **Cultura do arroz**. 2. ed. Lavras: UFLA, 2005. 130 p.

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.

SOUZA, M. L.; MENEZES, H. C. Processing of Brazil nut and meal and cassava flour: quality parameters. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 24, n. 1, p. 120-128, 2004.

TERRY, N. et al. Selenium in higher plants. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, Palo Alto, v. 51, p. 401-432, Sept. 2000.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. **Dietary reference intakes: elements**. Washington, 2003. Disponível em:
<<http://www.iom.edu/Global/News%20Announcements/~media/48FAAA2FD9E74D95BBDA2236E7387B49.ashx>>. Acesso em: 18 jan. 2010.

VALKAMA, E. et al. The combined effects of enhanced UV-B radiation and selenium on the growth, chlorophyll fluorescence and ultrastructure in strawberry (*Fragaria x ananassa*) and barley (*Hordeum vulgare*) treated in the field. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 120, n. 1/4, p. 267-278, Dec. 2003.

VILLAR, P. M. del. Tendências da produção e do comércio mundial do arroz. In: CONGRESSO DA CADEIA PRODUTIVA DE ARROZ, 1.; REUNIÃO NACIONAL DE PESQUISA DE ARROZ, 7., 2002, Santo Antônio de Goiás. **Anais...** Santo Antônio de Goiás: EMBRAPA Arroz e Feijão, 2002. p. 111-114.

WELCH, R. Micronutrients, agriculture and nutrition: linkages for improved health and well being. In: _____. **Perspectives on the micronutrient nutrition of crops**. Jodhpur: Scientific, 2001. p. 247-289.

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, Apr. 2009.

XUE, T.; HARTIKAINEN, H. Association of antioxidative enzymes with the synergic effect of selenium and UV irradiation in enhancing plant growth. **Agricultural and Food Science in Finland**, Jokioinen, v. 9, n. 1, p. 177-186, Feb. 2000.

XUE, T.; HARTIKAINEN, H.; PIIRONEN, V. Antioxidative and growth-promoting effect of selenium on senescing lettuce. **Plant and Soil**, The Hague, v. 237, n. 1, p. 55-61, 2001.

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, Oct. 1998.

ZHANG, P. C.; SPARKS, D. L. Kinetics of selenate and selenite adsorption/desorption at the goethite/water interface. **Environmental Science & Technology**, Easton, v. 24, n. 12, p. 1848-1856, Dec. 1990.

ZHANG, Y. et al. Uptake and transport of selenite and selenate by soybean seedlings of two genotypes. **Plant and Soil**, The Hague, v. 253, n. 2, p. 437-443, June 2003.

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.

**CAPÍTULO 2 - Biofortificação Agronômica com Selênio em Arroz
Adubado com Selenato e Selenito**

RESUMO

O selênio (Se) é essencial para os seres humanos e animais, no entanto em diversas regiões do mundo a baixa ingestão dietética desse elemento em humanos tem sido verificada, acarretando problemas para a saúde. Considerando a importância do arroz na alimentação humana, sendo alimento básico em mais de 30 países, objetivou-se, neste trabalho, avaliar o efeito da aplicação de doses de selenato e selenito na biofortificação com Se, no crescimento e produção de plantas de arroz, na eficiência das raízes em absorver o Se, no aproveitamento do Se aplicado, além de verificar a influência dessas formas de Se nos teores de P, S, Fe e Zn, em grãos de arroz. O experimento foi conduzido em casa de vegetação, em vasos com 4 dm³ de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, textura média. O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado, em esquema fatorial 5 × 2, sendo cinco doses de Se (0; 0,75; 1,50; 3,0; 6,0 mg dm⁻³) e duas fontes de Se (selenato de sódio e selenito de sódio), com cinco repetições. Os teores de Se nas raízes, parte aérea e grãos foram determinados por espectrometria de fluorescência de raios-X por reflexão total. O Se aplicado como selenato proporcionou maior eficiência na sua absorção pelas raízes, aproveitamento pela planta, translocação para a parte aérea e teor desse elemento nos grãos. A biofortificação agronômica com Se em arroz foi melhor alcançada na dose de 0,75 mg dm⁻³ ao se utilizar o Se na forma de selenito, ou doses menores ao se utilizar o selenato. A aplicação de Se junto à adubação influenciou os teores de P, S, Fe e Zn nos grãos do arroz. Os resultados do presente estudo indicaram que é possível aumentar o teor de Se em arroz, com o uso de selenato e selenito na adubação, para minimizar a deficiência desse elemento na população humana.

Palavras-chave: Selenato. Selenito. Aproveitamento de Selênio. Arroz enriquecido. Segurança alimentar.

ABSTRACT

Selenium (Se) is essential for humans and animals, though in different regions of the world at low dietary intake of this element in humans has been observed, leads to health problems such. Considering the importance of rice for human consumption, being a staple food for more than 30 countries. The aim of this study was to evaluate the effect of doses of selenate and selenite in Se biofortification, growth and yield of rice plants, the efficiency of root uptake of Se, use efficiency of applied Se, and to evaluate the influence of these forms of Se in the levels of P, S, Fe and Zn in grain rice. The experiment was conducted in a greenhouse, in pots with 4 dm³ of a Red-Yellow Latosol, medium texture. The experimental design was completely randomized in factorial scheme 5 × 2, with five doses of Se (0, 0.75, 1.50, 3.0, 6.0 mg dm⁻³) and two forms of Se (sodium selenate and sodium selenite), with five repetitions. The levels of Se in roots, shoots and grains were determined by total reflection X-ray fluorescence spectrometry. The results shows that Se applied as selenate provided greater efficiency of root uptake of Se, use efficiency of applied Se, translocation from roots to shoot and content of this element in rice grain. The agronomic biofortification when used selenate at 0.75 mg dm⁻³ was better than selenite. The Se application together the fertilization influenced the levels of P, S, Fe and Zn in grains of rice. The results of this study show the possibility to increase the Se accumulation in rice, by use of selenite and selenate fertilization for decrease the Se deficiency in the human population.

Keywords: Selenate. Selenite. Use of selenium. Enriched rice. Food security.

1 INTRODUÇÃO

O selênio (Se) é considerado essencial para os seres humanos e animais (RAYMAN, 2002). Diversas regiões do mundo têm associado a baixa ingestão dietética desse elemento nos seres humanos com problemas relacionados à saúde, como aumento na incidência de câncer (COMBS, 2001). Nesse sentido, estratégias para diminuir a deficiência de Se têm sido frequentemente associadas para aumentar o teor desse elemento nos alimentos (RAMOS et al., 2010; WHITE; BROADLEY, 2009).

Atualmente, a biofortificação agronômica com Se, que consiste basicamente no aumento da concentração desse elemento nas culturas agrícolas, através da sua introdução na adubação das plantas, tem demonstrado satisfatórios resultados (GRAHAM et al., 2007). Nesse sentido, Chen et al. (2002), para a cultura do arroz verificaram, que o teor de Se nessa cultura aumentou com a introdução desse elemento na adubação, demonstrando ser essa uma técnica útil para elevar a ingestão de Se pela população. Além disso, Combs (2001) relatou que o nível adequado de Se em uma população está altamente correlacionada com o conteúdo de Se nas culturas agrícolas. Assim, pelo fato do arroz ser alimento básico predominante em mais de 30 países (LUCCA; POLETTI; SAUTTER, 2006) e pela deficiência do Se atingir aproximadamente 1 bilhão de pessoas no mundo (WHITE; BROADLEY, 2009), essa cultura agrícola apresenta enorme potencial para estudos com Se visando diminuir a deficiência desse elemento na população mundial.

Ressalta-se que, em programas de biofortificação com Se, deve-se levar em conta a fonte de Se aplicada, uma vez que os solos intemperizados, com elevadas concentrações de óxidos de Fe e Al na fração argila, pode adsorver o selenito, reduzindo, conseqüentemente, sua disponibilidade para as plantas (ZHANG; SPARKS, 1990). Segundo Rovira et al. (2008) o Se na forma de

selenito pode sofrer adsorção específica com a hematita e goethita, formando complexos de esfera-interna, o que pode torná-lo indisponível para as plantas. O mesmo não ocorre com o Se na forma de selenato, que é estável em ambientes oxidados, sendo muito móvel em solos, estando prontamente disponível para as plantas. Além das diferenças de comportamento das formas de Se no solo, essas também diferem na absorção e na mobilidade do Se no interior das plantas, sendo o Se do selenato mais facilmente transportado para a parte aérea, enquanto que o Se do selenito tende a se acumular nas raízes das plantas (ZHANG et al., 2003).

Nesse contexto, devido à importância do arroz na alimentação humana, associada à escassez de informações envolvendo a biofortificação agrônômica com Se no Brasil, objetivou-se, neste trabalho, avaliar o efeito da aplicação de doses de selenato e selenito na biofortificação com Se, bem como verificar a influência dessas formas de Se nos teores de P, S, Fe e Zn nos grãos de arroz.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em casa de vegetação no Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras, utilizando-se vasos com 4 dm³ de solo, preenchidos com amostras da camada de 0-20 cm de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, textura média. As análises físicas e químicas do solo, conforme método descrito pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA (1997), e mineralógicas de acordo com Souza (2005), apresentaram os seguintes valores: teor de areia: 60 dag kg⁻¹; silte: 17 dag kg⁻¹; argila: 23 dag kg⁻¹; pH em água: 5,4; MOS: 1,2 dag kg⁻¹; P (Mehlich 1): 0,9 mg dm⁻³; K: 23,4 mg dm⁻³; Ca: 0,3 cmol_c dm⁻³; Mg: 0,1 cmol_c dm⁻³; Al: 0,1 cmol_c dm⁻³; H + Al: 0,9 cmol_c dm⁻³; P-rem: 20,5 mg L⁻¹; Fe₂O₃: 37,8 g kg⁻¹;

e Al_2O_3 : $168,1 \text{ g kg}^{-1}$. O teor total de Se foi de $0,064 \text{ mg dm}^{-3}$, conforme metodologia proposta por Ramos et al. (2010).

O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado, em esquema fatorial 5×2 , sendo cinco doses de Se (0; 0,75; 1,50; 3,0; 6,0 mg dm^{-3}) aplicadas no solo e duas formas de Se (selenato de sódio – Na_2SeO_4 e selenito de sódio – Na_2SeO_3), com cinco repetições, perfazendo um total de 50 parcelas. Cada unidade experimental foi constituída por duas plantas por vaso.

Com base na análise química do solo, foi efetuada a calagem visando elevar a saturação por bases a 50%, utilizando-se calcário calcinado e micropulverizado, contendo 32% de CaO, 15% de MgO e PRNT = 94,5%. Após incubação do solo por 30 dias, com umidade próxima a 60% do volume total de poros (VTP), as doses de selênio foram aplicadas ao solo, em ambas as formas. Juntamente com a aplicação dos tratamentos com Se, foi efetuada a adubação básica de plantio com 80 mg de N, 250 mg de P, 70 mg de K e 60 mg de S por dm^3 de solo, utilizando as seguintes fontes: nitrato de amônio – NH_4NO_3 , fosfato monoamônio – $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, sulfato de potássio – K_2SO_4 . A adubação básica com micronutrientes consistiu-se na aplicação de 3,6 mg de Mn; 1,5 mg de Cu; 5 mg de Zn; 0,5 mg de B e 0,15 mg de Mo por dm^3 de solo, fornecidos na forma de cloreto de manganês – $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, sulfato de cobre – $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, sulfato de zinco – $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, ácido bórico – H_3BO_3 e molibdato de amônio – $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$.

Em seguida, foram semeadas 10 sementes do arroz (*Oryza sativa* L. cv BRSMG Relâmpago) por vaso e desbastadas para duas plântulas uma semana após emergência. Durante o período de cultivo, o arroz recebeu adubações de cobertura nas doses de 450 mg de N e 350 mg de K por dm^3 de solo, divididas em oito aplicações, utilizando-se o nitrato de amônio – NH_4NO_3 e o nitrato de potássio – KNO_3 . Durante a condução do experimento, a umidade do solo foi

mantida próximo a capacidade de campo através de pesagens diárias do conjunto vaso-solo-planta, repondo-se o volume evapotranspirado com água deionizada.

A colheita das plantas foi feita no final do ciclo. O material vegetal foi seco em estufa com circulação forçada de ar a 65-70°C, até a secagem completa das amostras, para quantificação da massa seca de raiz, de parte aérea (folhas + caule) e de grãos, sendo que nos grãos foram realizadas análises químicas para a determinação dos teores de P, S, Fe e Zn, de acordo com a metodologia descrita por Malavolta, Vitti e Oliveira (1997).

Para a determinação dos teores de Se nas raízes, parte aérea e grãos, realizou-se a digestão das amostras conforme descrito por Ramos et al. (2010). A quantificação de Se nos extratos foi realizada por espectrometria de fluorescência de raios-X por reflexão total (S2 PICOFOX – Bruker), adicionando-se 10 µL do extrato em porta amostras de quartzo. Utilizou-se o gálio como padrão interno e o tempo de leitura foi de 400 segundos. Para avaliar a acurácia das análises utilizou-se material certificado de referência internacional (BCR402, White Clover - IRMM), o qual foi incluído em cada bateria de digestão. Relacionando-se os teores de Se com a massa seca produzida, foi determinado o acúmulo de Se em cada parte e o total da planta para cada tratamento. Uma vez obtidos esses dados, estimaram-se os seguintes índices:

- Eficiência das Raízes na Absorção de Se = (mg de Se total acumulado na planta / g massa seca de raízes);

- Eficiência de Aproveitamento do Se Aplicado = [(mg Se total acumulado) / (mg de Se aplicado) x 100].

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância, teste de média (Scott-Knott) e regressão polinomial utilizando-se o programa estatístico SISVAR (FERREIRA, 2000).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A produção de matéria seca da raiz e parte aérea foi afetada significativamente pela interação entre doses e formas de Se (Figura 1 A e B). Para a produção de grãos, essa interação não foi significativa (Figura 1 C). Entretanto, essa variável apresentou diferença significativa ao se compararem as formas de Se utilizadas (Figura 1 D).

Para a massa seca das raízes (Figura 1 A), o aumento das doses de selenato proporcionou redução linear, enquanto que para o selenito foi quadrática. Houve redução média na produção de raízes, ao se compararem as maiores doses de Se com o tratamento controle, de aproximadamente 13 e 21%, para o selenito e selenato, respectivamente. Esse comportamento diferenciado promovido pelas formas de Se aplicadas deve-se, possivelmente, à adsorção sofrida pelo selenito no solo, o que tornou esse elemento menos disponível e menos fitotóxico para as raízes, quando comparado com o selenato. No presente estudo, apesar de se ter utilizado um solo de textura média (23% de argila) e com baixos teores de óxidos de Fe e Al (37,8 e 168,1 g kg⁻¹, respectivamente), esse, provavelmente, influenciou a disponibilidade do Se quando se utilizou o selenito. Segundo Hopper e Parker (1999), as diferenças de comportamento entre o selenato e selenito nos solos são esperadas, devido às diferenças da afinidade desses com os colóides do solo, o que afeta, conseqüentemente, suas solubilidades e disponibilidades para as plantas. Esses autores relatam que, para uma mesma quantidade de selenato e selenito aplicada no solo, esse último é mais adsorvido nas superfícies dos óxidos, o que o torna menos disponível para as plantas.

Verifica-se que a produção da massa seca da parte aérea (Figura 1 B), apresentou resposta crescente até a dose de 0,75 mg dm⁻³, a qual proporcionou

aumento de 8% quando aplicou-se o selenato. No entanto, o aumento das doses para ambas as formas de Se proporcionou queda na produção para essa variável.

O efeito da aplicação de Se para a produção de grãos (Figura 1 C) seguiu a mesma tendência apresentada para a produção de massa seca da parte aérea quando aplicou-se o selenato (Figura 1 B), ou seja, verificou-se aumento de 13% na produção de grãos na dose 0,75 mg dm⁻³, independentemente das formas de Se aplicadas. Quanto às formas de Se, observou-se que o selenito foi superior ao selenato na produção de grãos (Figura 1 D). Os aumentos na produção da parte aérea e grãos eram esperados, uma vez que o Se aplicado em baixas concentrações aumenta a atividade antioxidante, levando a uma maior produção vegetal (HARTIKAINEN; XUE; PIIRONEN, 2000; RAMOS et al., 2011).

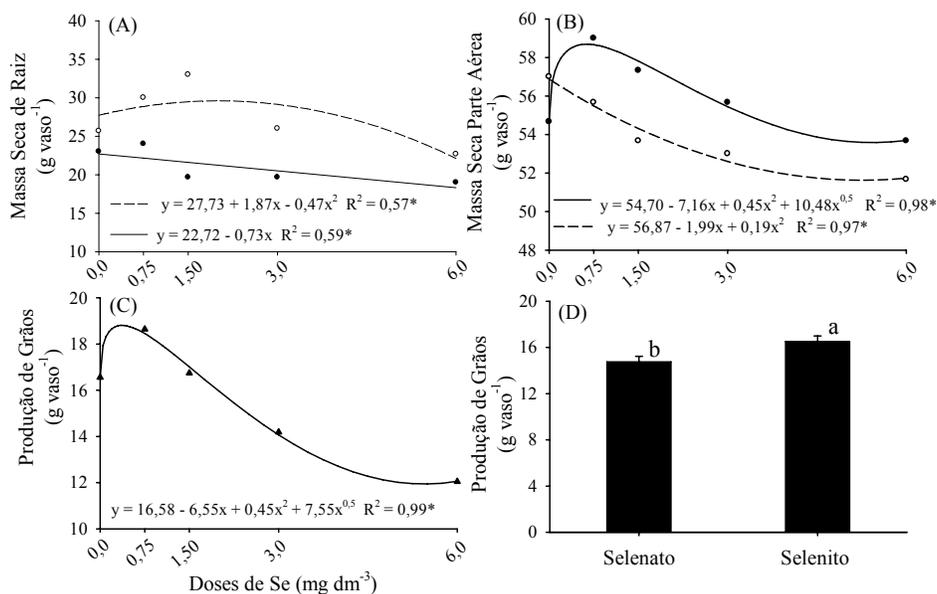


Figura 1 Massa seca da raiz (A), parte aérea (B), produção de grãos (C e D) em plantas de arroz em função da aplicação de doses e formas de Se. * Significativo a 5% de probabilidade pelo teste t (° selenito, • selenato, ▲ independentemente da forma de Se). Médias seguidas da mesma letra, comparando formas de Se, não diferem entre si (Scott-Knott, $p \leq 0,05$)

Embora o selenito tenha proporcionado maior produção de matéria seca de raiz (Figura 1 A), esse fato não se repetiu na eficiência das raízes na absorção de Se (Figura 2 A). Dessa forma, o total de Se acumulado na planta por grama de raiz produzida, em todas as doses aplicadas, foi sempre superior quando se utilizou o selenato. Tal fato está relacionado ao maior teor de Se nos tecidos e, conseqüentemente, ao maior acúmulo de Se nas plantas de arroz, quando o selenato foi aplicado.

Com relação à eficiência no aproveitamento do Se aplicado (Figura 2 B), que representa o percentual do Se aplicado em ambas as formas que foi absorvido e acumulado pelo arroz, o selenato, tal como observado para a eficiência das raízes na absorção de Se (Figura 2 A), proporcionou melhor aproveitamento do Se aplicado. Esse resultado mostra que, apesar de se ter utilizado um solo de textura média e com baixos teores de óxidos de Fe e Al, esse influenciou no aproveitamento do Se quando o selenito foi aplicado. Nesse sentido, Wijnja e Schulthess (2000) relataram que o comportamento do selenato no solo é semelhante ao sulfato, enquanto o selenito se assemelha mais ao fosfato. Assim, em solos altamente intemperizados, os óxidos de Fe, Al e Mn podem diminuir consideravelmente o aproveitamento do Se ao utilizar-se o selenito.

Na Figura 2 C, verifica-se que a translocação do Se foi sempre maior quando fornecido na forma de selenato. Nos tratamentos que receberam as doses de Se, em média, 78% e 47% do elemento aplicado foram translocados para a parte aérea, para o selenato e selenito, respectivamente. Segundo Li, McGrath e Zhao (2008), a superioridade do selenato sobre o selenito no transporte de Se pelas plantas deve-se à menor conversão do selenato a formas orgânicas de Se nas raízes, o que favorece a mobilidade no xilema, enquanto que o selenito, quando absorvido pelas plantas é rapidamente convertido para as formas orgânicas, as quais apresentam menor mobilidade no xilema. Esses resultados

são semelhantes aos obtidos em outros trabalhos, os quais relatam superioridade do selenato sobre o selenito no transporte de Se pelas plantas (RAMOS et al., 2010; SHARMA et al., 2010).

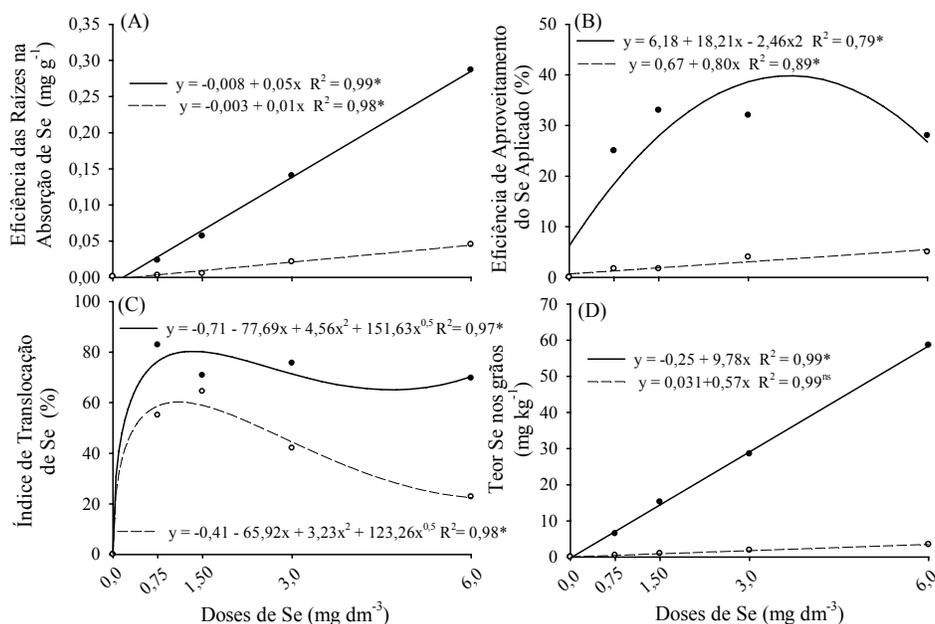


Figura 2 Efiência das raízes na absorção de Se (A), efiência no aproveitamento do Se aplicado (B), índice de translocação de Se (C) e teor de Se nos grãos (D) em plantas de arroz em função da aplicação de doses e formas de Se. *, ^{ns} Significativo a 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente, pelo teste t. (◦ selenito, • selenato)

Os teores de Se nos grãos de arroz foram afetados significativamente pela interação entre doses e formas de Se (Figura 2 D). Os maiores teores desse elemento foram observados quando se utilizou o Se na forma de selenato. Esse fato deve-se, possivelmente, à maior absorção das raízes, aproveitamento pela planta, translocação do Se para a parte aérea (Figura 2 A, B e C) e, à maior

eficiência em redistribuir esse elemento para os grãos, ao se utilizar na forma de selenato. Esse resultado concorda com os observados por Li et al. (2010), ao avaliarem o efeito de diferentes manejos da cultura e formas de Se nos teores desse elemento nos grãos de arroz.

Segundo a Food and Agriculture Organization of the United Nations - FAO (2011), o consumo médio de arroz por pessoa no mundo é de 180 g dia⁻¹ e, de acordo com a United States Department of Agriculture - USDA (2003), a recomendação de ingestão diária mínima de Se para adultos é de 70 µg dia⁻¹ e o nível máximo tolerável de 400 µg dia⁻¹. Relacionando esses dados com os do presente trabalho na dose de 0,75 mg dm⁻³, a qual promoveu aumento na produção de grãos, verificou-se que o teor de Se encontrado nos grãos de arroz quando utilizou-se o selenato e selenito contribui para a ingestão diária de Se em, aproximadamente, 1100 e 80 µg dia⁻¹, respectivamente. Assim, são necessários mais estudos envolvendo a biofortificação agrônômica com Se em arroz, no sentido de adequarem doses a serem aplicadas, em diferentes solos, para maior segurança alimentar.

Os teores de P e S nos grãos foram afetados significativamente pelas doses e formas de Se (Figura 3 A e B). Verificou-se que as doses de selenato não influenciaram o teor de P nos grãos, enquanto que o selenito proporcionou redução (Figura 3 A). Nesse sentido, estudos têm indicado que o selenito compete com o P no processo de absorção (HOPPER; PARKER, 1999) afetando, conseqüentemente, o teor de P nas plantas (LI; MCGRATH; ZHAO, 2008).

Devido à semelhança química entre S e Se, as plantas absorvem e metabolizam o Se via rota de absorção e assimilação do S (PILON-SMITS; QUINN, 2010). Além disso, estudos relatam que o selenato utiliza os mesmos transportadores de membrana do sulfato, aumentando o teor desse último (SORS; ELLIS; SALT, 2005). No presente estudo, o aumento nas doses de

selenato aumentou o teor de S nos grãos de arroz, com a maior dose aplicada proporcionando os maiores teores de S (Figura 3 B). Por outro lado, não se observou efeito significativo quando se utilizou o Se na forma de selenito. Ramos et al. (2011), ao avaliarem o efeito do selenito e selenato em diversos germoplasmas de alface, observaram que o selenato promoveu aumento no teor de S. Resultados semelhantes ao presente trabalho também foram verificados por Mikkelsen e Wan (1990) em cevada e arroz. Segundo esses autores, a interação sinérgica entre o Se e o S pode ocorrer em muitas espécies vegetais.

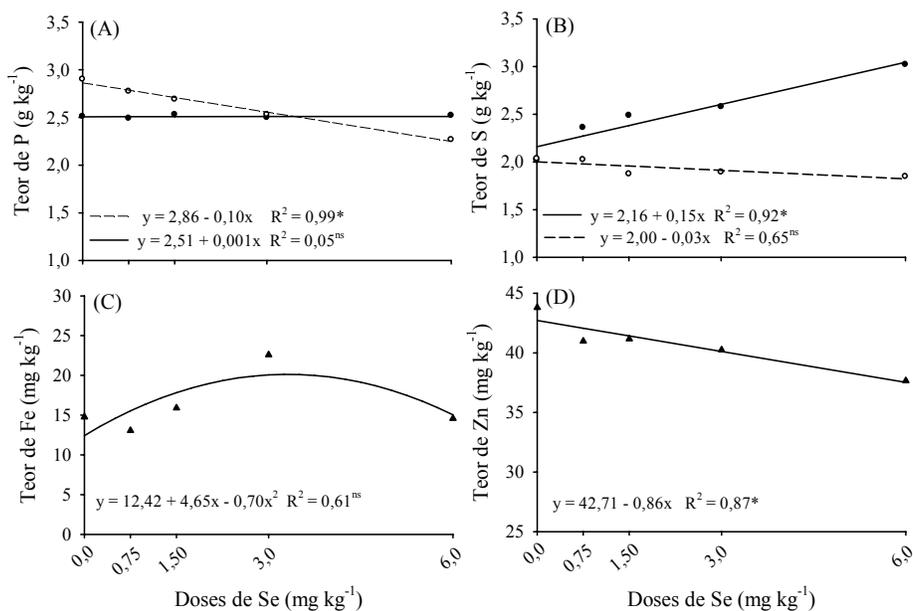


Figura 3 Teor de P (A), S (B), Fe (C) e Zn (D) em grãos de arroz em função da aplicação de doses e formas de Se. *, ^{ns} Significativo a 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente, pelo teste t. (° selenito, • selenato, ▲ independentemente da forma de Se)

Segundo Welch e Graham (2004), os seres humanos necessitam de 22 elementos minerais para o perfeito funcionamento do corpo e, esses podem ser adquiridos através de uma dieta balanceada (GRAHAM et al., 2007). No

entanto, estudos apontam que mais de 60% e 30% da população mundial apresentam deficiência por Fe e Zn, respectivamente (WHITE; BROADLEY, 2009). Devido à importância do arroz na alimentação humana, sendo fonte de nutrientes para mais da metade da população mundial (SAUTTER et al., 2006), torna-se relevante avaliar não somente o teor de Se nos grãos dessa cultura, mas, também, os teores de Fe e Zn, além do efeito do Se nesses. Assim, verificou-se que os teores de Fe e Zn, não foram influenciados significativamente pelas formas de Se e, de maneira geral, o aumento nas doses de Se não influenciou no teor de Fe (Figura 3 C), enquanto diminuiu o teor de Zn (Figura 3 D). No entanto, estudos realizados por Zembala et al. (2010), em colza e trigo, concluíram que a aplicação do Se aumentou os teores de Zn, enquanto diminuiu os teores de Fe.

4 CONCLUSÕES

O Se aplicado como selenato proporciona maior eficiência na sua absorção pelas raízes, aproveitamento pela planta, translocação para a parte aérea e teor desse elemento, nos grãos.

A biofortificação agronômica com Se em arroz é melhor alcançada na dose de $0,75 \text{ mg dm}^{-3}$ ao se utilizar o Se na forma de selenito, ou doses menores ao utilizar-se o selenato.

É possível aumentar o teor de Se em arroz, com o uso de selenato e selenito na adubação.

A aplicação de Se, junto à adubação, influenciou os teores de P, S e Zn nos grãos do arroz.

REFERÊNCIAS

- CHEN, L. et al. Determination of selenium concentration of rice in China and effect of fertilization of selenite and selenate on Se content of rice. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Easton, v. 50, n. 18, p. 5128-5130, Aug. 2002.
- COMBS, G. F. Selenium in global food systems. **British Journal of Nutrition**, Cambridge, v. 85, n. 5, p. 517-547, May 2001.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro, 1997. 212 p. (Documentos, 1).
- FERREIRA, D. F. Análises estatísticas por meio do Sisvar para Windows versão 4.0. In: REUNIÃO ANUAL DA REGIÃO BRASILEIRA DA SOCIEDADE INTERNACIONAL DE BIOMETRIA, 45., 2000, São Carlos. **Anais...** São Carlos: UFSCAR, 2000. p. 255-258.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **FAO cereal supply and demand brief**. Rome, 2011. Disponível em: <<http://www.fao.org/worldfoodsituation/wfs-home/csdb/en/>>. Acesso em: 19 set. 2011.
- GRAHAM, R. et al. Nutritious subsistence food systems. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 92, n. 1, p. 1-74, Jan. 2007.
- HARTIKAINEN, H.; XUE, T. L.; PIIRONEN, V. Selenium as an antioxidant and pro-oxidant in ryegrass. **Plant and Soil**, The Hague, v. 225, n. 1, p. 193-200, Jan. 2000.
- HOPPER, J.; PARKER, D. Plant availability of selenite and selenate as influenced by the competing ions phosphate and sulfate. **Plant and Soil**, The Hague, v. 210, n. 1, p. 199-207, Feb. 1999.
- LI, H. et al. Selenium speciation in soil and rice: influence of water management and Se fertilization. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Easton, v. 58, n. 22, p. 11837-11843, Nov. 2010.
- LI, H.; MCGRATH, S.; ZHAO, F. Selenium uptake, translocation and speciation in wheat supplied with selenate or selenite. **New Phytologist**, Cambridge, v. 178, n. 1, p. 92-102, 2008.

- LUCCA, P.; POLETTI, S.; SAUTTER, C. Genetic engineering approaches to enrich rice with iron and vitamin A. **Physiologia Plantarum**, Copenhagen, v. 126, n. 3, p. 291-303, Mar. 2006.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2. ed. Piracicaba: POTAFOS, 1997. 201 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, n. 1, p. 151-153, 1990.
- PILON-SMITS, E.; QUINN, C. Selenium metabolism in plants. In: HELL, R.; MENDEL, R. R. (Ed.). **Cell biology of metal and nutrients**. Berlin: Springer, 2010. p. 225-241.
- RAMOS, S. J. et al. Selenium accumulation in lettuce germplasm. **Planta**, Berlin, v. 233, n. 4, p. 649-660, Apr. 2011.
- _____. Selenium biofortification and antioxidant activity in lettuce plants fed with selenate and selenite. **Plant, Soil and Environment**, Praha, v. 12, n. 12, p. 583-587, Dec. 2010.
- RAYMAN, M. P. The argument for increasing selenium intake. **Proceedings of the Nutrition Society**, Cambridge, v. 61, n. 2, p. 203-215, May 2002.
- ROVIRA, M. et al. Sorption of selenium (IV) and selenium (VI) onto natural iron oxides: goethite and hematite. **Journal of Hazardous Materials**, Amsterdam, v. 150, n. 2, p. 279-284, Jan. 2008.
- SAUTTER, C. et al. Biofortification of essential nutritional compounds and trace elements in rice and cassava. **Proceedings of the Nutrition Society**, Cambridge, v. 65, n. 1, p. 153-159, Jan. 2006.
- SHARMA, S. et al. Comparative effects of selenate and selenite on growth and biochemical composition of rapeseed (*Brassica napus* L.). **Plant and Soil**, The Hague, v. 329, n. 1/2, p. 339-348, Apr. 2010.
- 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.

SOUZA, R. F. **Dinâmica de fósforo em solos sob influência da calagem e adubação orgânica, cultivados com feijoeiro**. 2005. 141 p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2005.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. **Dietary reference intakes: elements**. Washington, 2003. Disponível em: <<http://www.iom.edu/Global/News%20Announcements/~media/48FAAA2FD9E74D95BBDA2236E7387B49.ashx>>. Acesso em: 18 jan. 2010.

WELCH, R. M.; GRAHAM, R. D. Breeding for micronutrients in staple food crops from a human nutrition perspective. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 55, n. 396, p. 353-364, Feb. 2004.

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, Feb. 2009.

WIJNJA, H.; SCHULTHESS, C. P. Vibrational spectroscopy of selenate and sulfate adsorption mechanisms on Fe and Al (hydr) oxide surfaces. **Journal of Colloid and Interface Science**, New York, v. 229, n. 1, p. 286-297, Sept. 2000.

ZEMBALA, M. et al. Effect of selenium on macro- and microelement distribution and physiological parameters of rape and wheat seedlings exposed to cadmium stress. **Plant and Soil**, The Hague, v. 329, n. 1/2, p. 457-468, Apr. 2010.

ZHANG, P. C.; SPARKS, D. L. Kinetics of selenate and selenite adsorption/desorption at the goethite/water interface. **Environmental Science and Technology**, New York, v. 24, n. 12, p. 1848-1856, Dec. 1990.

ZHANG, Y. et al. Uptake and transport of selenite and selenate by soybean seedlings of two genotypes. **Plant and Soil**, The Hague, v. 253, n. 2, p. 437-443, June 2003.

**CAPÍTULO 3 - Formas de Aplicação e Fontes de Selênio na Biofortificação
do Arroz**

RESUMO

O selênio (Se) é considerado essencial para humanos e animais por fazer parte de uma série de reações químicas e possuir propriedades antioxidantes, sendo considerado um dos elementos-traço mais importantes para a saúde humana e animal. Objetivou-se, neste trabalho, avaliar o efeito de diferentes formas de aplicação e fontes de Se no crescimento, produção de grãos de arroz, teor e acúmulo de Se, bem como nos teores de N, P, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn e Zn nos grãos de arroz. O experimento foi conduzido em casa de vegetação, utilizando-se vasos com 4 dm³ de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, textura média. O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado, em esquema fatorial 2 × 2 × 2, sendo: com e sem aplicação de Se; dois modos de aplicação de Se (via solo e foliar) e duas fontes de Se (selenato de sódio e selenito de sódio), com cinco repetições. Os teores de Se nos grãos, foram determinados por espectrometria de fluorescência de raios X por reflexão total. A aplicação de Se no solo como selenato aumentou a produção de massa seca e, ambas as fontes de Se, via foliar, aumentaram a produção de grãos. A aplicação de selênio tanto foliar quanto via solo promoveu aumentos nos seus teores nos grãos do arroz, sendo a via solo a mais efetiva. Em ambas as formas de aplicação, o selenato promoveu maiores teores do elemento nos grãos do arroz. Os teores dos macros e micronutrientes nos grãos do arroz foram influenciados pela forma de aplicação e fontes de Se.

Palavras-chave: *Oryza sativa*. Selenato. Selenito. Aplicação foliar.

ABSTRACT

Selenium (Se) is considered essential for humans and animals to be part of a series of chemical reactions and antioxidant properties, and it is considered one of the most important trace-element for human and animal health. The aim of this study was to evaluate the effect of different application forms and sources of Se on growth, grain production, concentration and accumulation of Se in grain, as well levels of N, P, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn and Zn in rice grains. The experiment was conducted in a greenhouse, in pots with 4 dm³ of a Red-Yellow Latosol, medium texture. The experimental design was completely randomized in 2 × 2 × 2 factorial scheme, with and without Se application; two forms of Se application (soil and foliar application) and two sources of Se (selenate and selenite), with five repetitions. The Se levels in rice plants was determined by total reflection X-ray fluorescence spectrometry. The results shows that Se applied as selenate in the soil increased shoot dry matter production, and both Se sources in foliar application, increased grain yield. The both form of Se application promoted increases in their levels in rice, but soil application was more effective. The levels of macro and micronutrients in grains of rice were influenced by the form of application and sources of Se.

Keywords: *Oryza sativa*. Selenate. Selenite. Foliar application.

1 INTRODUÇÃO

O selênio (Se) é considerado essencial para humanos e animais por fazer parte de uma série de reações químicas e possuir propriedades antioxidantes (FAIRWEATHER-TAIT et al., 2011), sendo considerado um dos elementos-traço mais importantes para a saúde humana e animal (CHAUDHARY et al., 2010). A deficiência desse elemento tem sido associada à ocorrência de sérias doenças como cardiopatias e muitos tipos de câncer (RAYMAN, 2002).

Ao contrário dos seres humanos e animais, o Se não é considerado essencial para as plantas (PILON-SMITS; QUINN, 2010). Devido às suas propriedades químicas semelhantes ao enxofre (S), o Se é absorvido e metabolizado pelos vegetais na mesma rota de assimilação do S, estando presente em aminoácidos sulfurados como selenometionina e selenocisteína (SORS; ELLIS; SALT, 2005). Em função da concentração de Se aplicado, esse pode exercer efeito duplo no crescimento das plantas. Nesse sentido, Hartikainen, Xue e Piironen (2000) relataram que, em baixas concentrações, o Se atua como um antioxidante e pode estimular o crescimento e a produção vegetal, enquanto que, em altas concentrações, favorece a oxidação das células, levando à redução no rendimento.

A baixa ingestão de Se pela população está relacionada com o consumo de alimentos com baixos teores desse elemento, devido à sua baixa concentração na maioria dos solos (PEDRERO; MADRID; CÂMARA, 2006). Segundo Combs (2001), aproximadamente 1 bilhão de pessoas no mundo apresentam deficiência por Se, sendo considerada a quarta deficiência mais grave de minerais, na qual o ferro (Fe) é a mais severa, seguida pelo zinco (Zn) e iodo (I) (WHITE; BROADLEY, 2009).

Devido à importância do Se na saúde humana, e à forte deficiência desse elemento em parte da população mundial, faz-se necessário buscar estratégias

para aumentar o seu teor nos alimentos. Nesse sentido, Chen et al. (2002), para a cultura do arroz, Hawkesford e Zhao (2007) e Lyons, Stangoulis e Graham (2004) para variedades de trigo, e, recentemente, Ramos et al. (2010) para a alface, demonstraram que o teor de Se nessas culturas aumentou com a introdução desse elemento na adubação o que, conseqüentemente, possibilita elevar-se a ingestão de Se pela população.

A escolha de culturas agrícolas amplamente consumidas pela população mundial possibilita maior sucesso nos programas de biofortificação. Nesse sentido, o arroz é alimento básico predominante em, pelo menos, 33 países, sendo um importante alimento para grande parte da população mundial (LUCCA; POLETTI; SAUTTER, 2006). Dessa forma, o aumento no teor de Se nos grãos de arroz poderia trazer benefícios à saúde humana. No entanto, para programas envolvendo a biofortificação com esse elemento, as formas de aplicação e as fontes de Se devem ser levadas em conta, uma vez que o Se, na forma de selenito, pode sofrer adsorção específica em óxidos de Fe e Al na fração argila, o que compromete a disponibilidade de Se para as plantas (MOUTA et al., 2008).

Devido à importância do arroz e do Se, objetivou-se, neste trabalho, avaliar o efeito de diferentes formas de aplicação e fontes de Se no crescimento, produção de grãos do arroz, teor e acúmulo de Se, bem como nos teores de N, P, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn e Zn nos grãos de arroz.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em casa de vegetação no Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras, utilizando-se vasos com 4 dm³ de solo, preenchidos com amostras da camada de 0-20 cm de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, textura média. As análises físicas e químicas do

solo, conforme método descrito pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA (1997), e mineralógicas de acordo com Souza (2005), apresentaram os seguintes valores: teor de areia: 60 dag kg⁻¹; silte: 17 dag kg⁻¹; argila: 23 dag kg⁻¹; pH em água: 5,4; MOS: 1,2 dag kg⁻¹; P (Mehlich 1): 0,9 mg dm⁻³; K: 23,4 mg dm⁻³; Ca: 0,3 cmol_c dm⁻³; Mg: 0,1 cmol_c dm⁻³; Al: 0,1 cmol_c dm⁻³; H + Al: 0,9 cmol_c dm⁻³; P-rem: 20,5 mg L⁻¹; Fe₂O₃: 37,8 g kg⁻¹; e Al₂O₃: 168,1 g kg⁻¹. O teor total de Se foi de 0,064 mg dm⁻³, conforme metodologia proposta por Ramos et al. (2010).

O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado, em esquema fatorial 2 × 2 × 2, sendo: com e sem aplicação de Se; dois modos de aplicação de Se (com: via solo na dose de 0,75 mg dm⁻³ e via foliar na concentração 50 μmol L⁻¹) e duas fontes de Se (selenato de sódio – Na₂SeO₄ e selenito de sódio – Na₂SeO₃), com cinco repetições, perfazendo um total de 40 parcelas. Cada unidade experimental foi constituída por duas plantas por vaso. Buscou-se, para a aplicação das fontes de Se no solo, uma dose que não compromettesse negativamente o desenvolvimento da cultura. Para a aplicação do Se via foliar, diante da falta de um consenso na literatura sobre a concentração a ser aplicada para esse elemento (KÁPOLNA et al., 2009), optou-se por uma concentração intermediária àquela proposta pelos autores citados anteriores.

Com base na análise química do solo, foi efetuada a calagem visando elevar a saturação por bases a 50%, utilizando-se calcário calcinado e micropulverizado, com 32 % de CaO, 15 % de MgO e PRNT = 94,5%. Após incubação do solo por 30 dias, com umidade próxima a 60% do volume total de poros (VTP), realizou-se a aplicação das fontes de Se no solo, juntamente com a adubação básica de plantio, onde foram aplicados 80 mg de N, 250 mg de P, 70 mg de K e 60 mg de S por dm³ de solo, utilizando-se as seguintes fontes: nitrato de amônio – NH₄NO₃, fosfato monoamônio – NH₄H₂PO₄, sulfato de potássio –

KSO₄. A adubação básica com micronutrientes consistiu na aplicação de 3,6 mg de Mn; 1,5 mg de Cu; 5 mg de Zn; 0,5 mg de B e 0,15 mg de Mo por dm³ de solo, fornecidos na forma de cloreto de manganês – MnCl₂.4H₂O, sulfato de cobre – CuSO₄.5H₂O, sulfato de zinco – ZnSO₄.7H₂O, ácido bórico – H₃BO₃ e molibdato de amônio – (NH₄)₆Mo₇O₂₄.4H₂O.

Em seguida, foram semeadas 10 sementes do arroz (*Oryza sativa* L. cv BRSMG Relâmpago) por vaso e desbastadas para duas plântulas uma semana após emergência. Durante o período de cultivo, o arroz recebeu adubações de cobertura nas doses de 450 mg de N e 350 mg de K por dm³ de solo, divididas em oito aplicações, utilizando o nitrato de amônio – NH₄NO₃ e o nitrato de potássio – KNO₃. Durante a condução do experimento, a umidade do solo foi rigorosamente controlada através de pesagens diárias do conjunto vaso-solo-planta, repondo-se o volume evapotranspirado com água deionizada.

A aplicação das fontes de Se, via foliar, foi realizada no florescimento da cultura, em três pulverizações, no período entre 8:00 e 9:00 horas da manhã, e com o intervalo de 3 dias para cada aplicação. Utilizou-se um pulverizador de compressão prévia de 1,25 L, distribuindo-se uniformemente a solução em todas as folhas e, de forma isolada, para evitar contaminações com plantas vizinhas.

A colheita das plantas do arroz foi feita no final do ciclo. O material vegetal colhido foi seco em estufa a 65-70°C, para obtenção da massa de parte aérea (folhas + caule) e dos grãos, sendo que nos grãos foram realizadas análises químicas para o de N, P, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn e Zn, de acordo com a metodologia descrita por Malavolta, Vitti e Oliveira (1997).

Para a determinação dos teores de Se nos grãos, realizou-se a digestão desses de acordo como descrito por Ramos et al. (2010) e, determinou-se o teor de Se nos extratos por fluorescência de raio X por reflexão total (PICOFOX – S2 Bruker), tendo como padrão interno o gálio e tempo de leitura de 400 segundos.

Para a certificação dos teores de Se, foi utilizado material certificado (White Clover-BCR402 IRMM), o qual foi incluído em cada bateria de digestão.

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância, teste de média (Scott-Knott), utilizando o programa estatístico SISVAR (FERREIRA, 2000).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A produção de massa seca da parte aérea (MSPA), produção de grãos (PG) e teor de Se nos grãos foram influenciados significativamente pelas formas de aplicação e fontes de Se, bem como pela interação entre esses fatores (Figura 1). Para a MSPA, verificou-se que a aplicação das fontes de Se, via foliar, não promoveu alteração nessas variáveis. No entanto, quando as fontes de Se foram aplicadas via solo, observou-se que o selenato proporcionou aumento de aproximadamente 6% para a MSPA (Figura 1A). Para a PG, a aplicação foliar das fontes de Se proporcionou aumento de 22% e 17% ao se aplicar o selenato e selenito, respectivamente (Figura 1B). Por outro lado, a aplicação das fontes de Se no solo não alteraram a PG. O aumento na MSPA quando aplicado o selenato no solo e, na produção de grãos, para ambas as fontes de Se aplicadas via foliar, pode estar relacionado aos efeitos benéficos do Se, em baixas doses aplicadas. Nesse sentido, diversos estudos têm apresentado maior produção vegetal em baixas doses de Se aplicadas (HARTIKAINEN; XUE; PIIRONEN, 2000; LYONS et al., 2009).

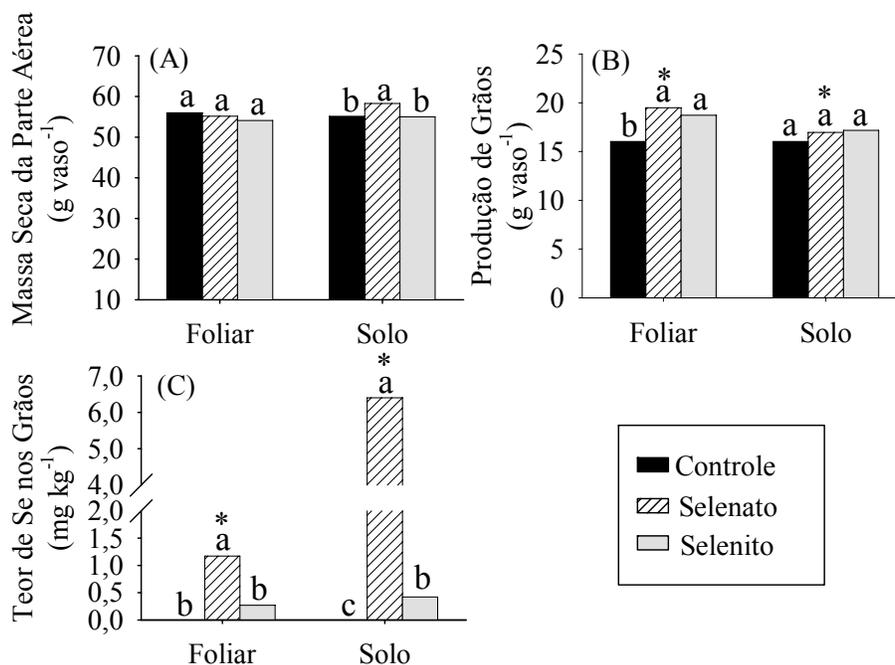


Figura 1 Massa seca de parte aérea (A), produção de grãos (B) e teor de selênio nos grãos (C), em plantas de arroz, em função de formas de aplicação e fontes de Se. Médias seguidas de mesma letra, comparando fontes de Se dentro de cada forma de aplicação, não diferem entre si (Scott-Knott, $p \leq 0,05$). Médias com asterisco (*), comparando as formas de aplicação de Se dentro de cada fonte de Se, diferem entre si (Scott-Knott, $P \leq 0,05$)

O efeito das formas de aplicação e fontes de Se sobre o teor de Se nos grãos encontra-se na Figura 1C. A aplicação de selenato via solo promoveu maior teor de Se nos grãos, sendo superior em 450% à aplicação dessa mesma fonte de Se via foliar (Figura 1C). Tal resultado pode estar relacionado ao maior tempo de contato da planta com o Se, promovido pela aplicação do Se via solo. Uma vez que a aplicação do Se via foliar foi realizada no momento do florescimento da cultura, possivelmente o tempo para ocorrer o transporte do Se via floema das folhas para os grãos não foi suficiente para elevar o teor do

elemento nos grãos. Também vale destacar que, entre as fontes de Se quando aplicadas via solo, os maiores teores desse elemento foram promovidos quando se utilizou o selenato. Esse fato deve-se, possivelmente, à adsorção específica que ocorre com o selenito em óxidos de Fe e Al, presentes em grande quantidade nos solos tropicais intemperizados (ROVIRA et al., 2008), promovendo menor absorção de Se pelas plantas. Além disso, sabe-se que essa é menos translocada nas plantas (CARTES; GIANFREDA; MORA, 2005; RAMOS et al., 2010; RÍOS et al., 2008; TERRY et al., 2000).

Combs (2001) afirma que o nível adequado de Se em uma população está altamente correlacionada com o conteúdo de Se nas culturas agrícolas. Assim, pelo fato do arroz ser alimento básico predominante em mais de 30 países (LUCCA; POLETTI; SAUTTER, 2006) e, a deficiência do Se atingir aproximadamente 1 bilhão de pessoas no mundo (WHITE; BROADLEY, 2009), essa cultura agrícola apresenta enorme potencial para aumentar o consumo de Se na população mundial. De acordo com a Food and Agriculture Organization of the United Nations - FAO (2011), o consumo médio de arroz por pessoa no mundo é de 180 g dia⁻¹ e, a recomendação de ingestão diária mínima de Se para adultos é de 70 µg dia⁻¹ e o nível máximo tolerável de 400 µg dia⁻¹ (UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE - USDA, 2003). Relacionando esses dados com os do presente trabalho, verificou-se que o teor encontrado nos grãos de arroz contribuíram para a ingestão dietética de Se em 210 e 48 µg dia⁻¹, via aplicação foliar e, 1150 e 75 µg dia⁻¹, via aplicação no solo, respectivamente para o selenato e selenito. Assim, são necessários mais estudos envolvendo a biofortificação agrônômica com Se em arroz, no sentido de se adequarem as doses a serem aplicadas via solo, em diferentes solos, bem como as épocas de aplicação, quando em via foliar, para uma maior segurança alimentar.

A absorção e mobilidade do selenato e selenito têm sido claramente diferenciadas em plantas (SORS; ELLIS; SALT, 2005; TERRY et al., 2000). Na

figura 2 A, B apresenta-se o acúmulo de Se total e na raiz, parte aérea e grãos do arroz e, a distribuição percentual desse acúmulo nessas partes. Como houve pequena variação na produção de massa seca da parte aérea e de grãos em função das fontes de selênio, em ambas as formas de aplicação (Figura 1A, B), o acúmulo de Se foi dependente do teor do elemento nas partes da planta. Assim, tal como observado na Figura 1C para os teores nos grãos, a aplicação de selenato no solo promoveu maiores acumulações de Se total e em todas as partes do arroz em relação ao selenito e, também, em relação ao próprio selenato aplicado via foliar (Figura 2A).

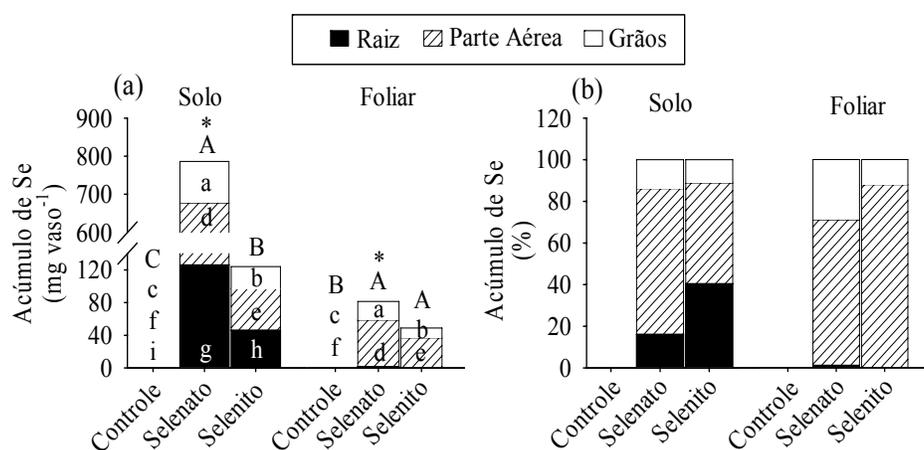


Figura 2 Acúmulo (a) e distribuição percentual (b) de selênio em partes da planta de arroz em função de formas de aplicação e fontes de selênio. Letras diferentes (**A**, **B** e **C** para acúmulo total de Se entre fontes de Se, dentro de cada forma de aplicação; **a**, **b** e **c** para acúmulo de Se no grão, dentro de cada forma de aplicação; **d**, **e** e **f** para acúmulo de Se na parte aérea, dentro de cada forma de aplicação; **g**, **h** e **i** para acúmulo de Se nas raízes, dentro de forma de aplicação) indicam diferença significativa entre médias (Scott-Knott, $p \leq 0,05$). (*), comparando-se as formas de aplicação de Se dentro de cada fonte de Se, diferem entre si (Scott-Knott, $P \leq 0,05$)

Embora o selenato via solo tenha possibilitado grande acúmulo de Se na planta, grande parte (cerca de 70%) foi acumulada na parte vegetativa do arroz (parte aérea), e menores quantidades nas raízes e nos grãos (Figura 2B). Observa-se que para, o selenito aplicado via solo, além da parte aérea, a raiz, proporcionalmente, acumulou grande quantidade de Se em detrimento dos grãos.

Para as fontes aplicadas via foliar, é interessante destacar que maior proporção de Se nos grãos foi observado quando se aplicou o selenato (Figura 2B). Esse fato permite inferir que o selenato é mais facilmente transportado pelo floema quando aplicado às folhas, tal como ocorre no xilema quando aplicado via radicular. Esses resultados são semelhantes aos observados por Poggi et al. (2000) que, ao aplicarem selenito e selenato via foliar na cultura da batata, também verificaram maior mobilidade no floema quando se utilizou o selenato, o que proporcionou maior teor de Se nessa cultura.

Vale destacar que as plantas que não receberam a aplicação de Se (tratamento controle) cresceram em solo com baixo teor natural do selênio ($0,064 \text{ mg dm}^{-3}$), o qual não foi suficiente para promover a biofortificação do arroz. Diante desse resultado e, de outros estudos que relatam os baixos teores de Se em solos brasileiros e alimentos (CARVALHO, 2011; FERREIRA et al., 2002; MORAES et al., 2009; SILLANPÄÄ; JANSSON, 1992) pode-se afirmar de forma consistente que, para se elevarem os teores de Se em culturas agrícolas em solos deficientes em Se e, conseqüentemente, na população, é necessário a aplicação de Se na adubação.

Para o teor de N nos grãos (Figura 3a), observou-se que não houve variação entre as formas e fontes de Se aplicadas. Ríos et al. (2010), ao avaliarem o efeito das fontes e concentrações de Se sobre a eficiência do uso de N em plantas de alface, não observaram variação no teor de N-NO_2^- nas plantas. Para o teor de P (Figura 3b), ao se compararem as formas de aplicação de Se, verificou-se que a aplicação via solo promoveu maiores teores de P. Na

aplicação foliar, independentemente da fonte de Se aplicada, observou-se redução dos teores de P nos grãos. Apesar da inibição competitiva do selenito na absorção do P ser documentada (HOPPER; PARKER, 1999), afetando, conseqüentemente, o teor de P nas plantas (LIN; MCGRATH; ZHAO, 2008), no presente estudo, não houve diferença significativa no teor de P, quando o selenito foi aplicado via solo. Deve-se considerar também, que o selenito sofre adsorção específica aos óxidos de Fe e Al no solo, reduzindo sua disponibilidade e, como observado na figura 2a, sua absorção pelas plantas. Com isso, haveria menor competição com o fosfato no processo de absorção.

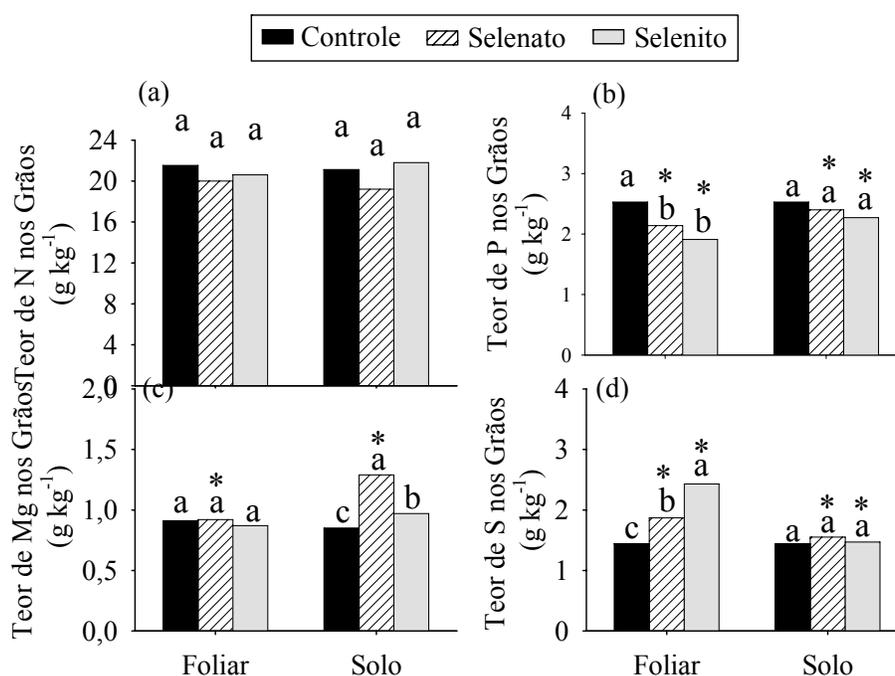


Figura 3 Teores nos grãos de N (a), P (b), Mg (c) e S (d) em plantas de arroz em função de formas de aplicação e fontes de Se. Médias seguidas de mesma letra, comparando-se fontes de Se dentro de cada forma de aplicação, não diferem entre si (Scott-Knott, $p \leq 0,05$). Médias com asterisco (*), comparando as formas de aplicação de Se dentro de cada fonte de Se, diferem entre si (Scott-Knott, $P \leq 0,05$)

As fontes de Se via foliar não afetaram o teor de Mg nos grãos de arroz (Figura 3c). Por outro lado, foi observado aumento nos teores de Mg quando essas fontes de Se foram aplicadas via solo. Para o teor de S nos grãos, os maiores valores foram observados quando as fontes de Se foram aplicadas via foliar (Figura 3d). Comparando-se as fontes de Se, dentro da aplicação foliar, o selenito proporcionou teores de S mais elevados que o selenato. Devido à semelhança química entre o S e Se, as plantas absorvem e metabolizam o Se via rota de absorção e assimilação do S (PILON-SMITS; QUINN, 2010) e, diversos trabalhos indicam efeito sinérgico do Se no aumento do teor de S em plantas (BARACK; GOLDMAN, 1997; MIKKELSEN; WAN, 1990).

De maneira geral, verificou-se que as formas e fontes de Se aplicadas promoveram comportamento diferenciado nos teores de micronutrientes (Figura 4). Para o teor de B, redução foi observada para ambas as formas de aplicação e fontes de Se utilizadas (Figura 4a). Para o teor de Cu, não foi observado diferença significativa quando as fontes de Se foram aplicadas via solo (Figura 4b). Entretanto, para essa mesma variável, a aplicação foliar do selenato aumentou o teor de Cu, enquanto o selenito promoveu redução. Pazurkiewicz-Kocot, Kita e Pietruszka (2008) também verificaram diminuição nos teores de Cu, quando adicionaram selenito no cultivo do milho.

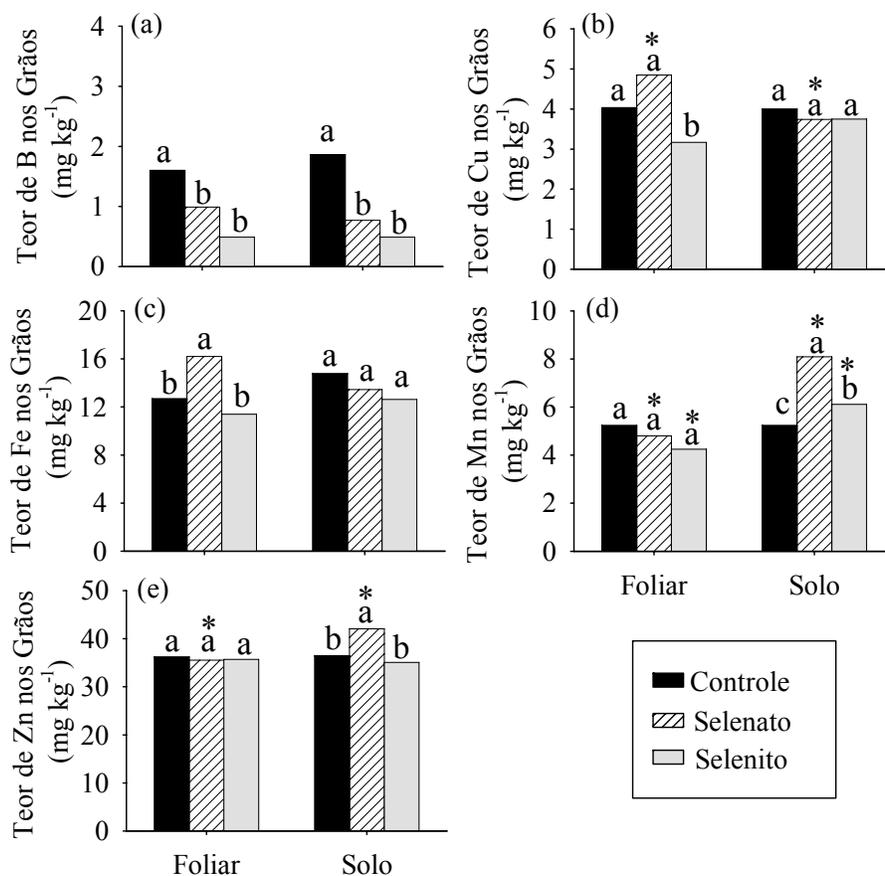


Figura 4 Teores nos grãos de B (a), Cu (b), Fe (c), Mn (d) e Zn (e) em plantas de arroz em função de formas de aplicação e fontes de Se. Médias seguidas de mesma letra, comparando fontes de Se dentro de cada forma de aplicação, não diferem entre si (Scott-Knott, $p \leq 0,05$). Médias com asterisco (*), comparando as formas de aplicação de Se dentro de cada fonte de Se, diferem entre si (Scott-Knott, $P \leq 0,05$)

Verificou-se aumento no teor de Fe quando o selenato foi aplicado via foliar (Figura 4c). Esse mesmo comportamento foi observado para o teor de Mn quando essa fonte de Se foi aplicada no solo (Figura 4d). Entretanto, diferença significativa entre as formas de aplicação de Se foram observadas apenas para o teor de Mn (Figura 4d). Fang et al. (2008) também observaram aumento no teor

de Fe, com a aplicação do Se via foliar. Com relação ao teor de Zn, apenas o selenato diferiu entre as formas de aplicação de Se, sendo os maiores valores de Zn observados quando essa fonte de Se foi aplicado no solo. Estudos realizados por Zembala et al. (2010) em colza e trigo, mostraram que a aplicação do Se aumentou os teores de Zn, enquanto diminuiu os teores de Fe.

4 CONCLUSÕES

A aplicação de Se no solo como selenato aumentou a produção de massa seca e, ambas as fontes de Se, via foliar, aumentaram a produção de grãos.

A aplicação de selênio, tanto foliar quanto via solo, promoveu aumentos nos seus teores nos grãos do arroz, sendo pela via solo mais efetiva.

Em ambas as formas de aplicação, o selenato promoveu maiores teores do elemento nos grãos do arroz.

Os teores dos macros e micronutrientes nos grãos do arroz foram influenciados pela forma de aplicação e fontes de Se.

REFERÊNCIAS

- BARACK, P.; GOLDMAN, I. L. Antagonistic relationship between selenate and sulfate uptake in onion (*Allium cepa*): implications for the production of organosulfur and organoselenium compounds in plants. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Easton, v. 45, n. 4, p. 1290-1294, Apr. 1997.
- CARTES, P.; GIANFREDA, L.; MORA, M. L. Uptake of selenium and its antioxidant activity in ryegrass when applied as selenate and selenite forms. **Plant and Soil**, The Hague, v. 276, n. 1/2, p. 359-367, Oct. 2005.
- CARVALHO, G. S. **Selênio e mercúrio em solos sob Cerrado nativo**. 2011. 93 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011.
- CHAUDHARY, M. et al. Effect of organic selenium supplementation on growth, se uptake, and nutrient utilization in guinea pigs. **Biological Trace Element Research**, Clifton, v. 133, n. 2, p. 217-226, Feb. 2010.
- CHEN, L. et al. Determination of selenium concentration of rice in China and effect of fertilization of selenite and selenate on Se content of rice. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Easton, v. 50, n. 18, p. 5128-5130, Aug. 2002.
- COMBS, G. F. Selenium in global food systems. **British Journal of Nutrition**, Cambridge, v. 85, n. 5, p. 517-547, May 2001.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro, 1997. 212 p. (Documentos, 1).
- FAIRWEATHER-TAIT, S. et al. Selenium in human health and disease. **Antioxidants & Redox Signaling**, New Rochelle, v. 14, n. 7, p. 1337-1383, Apr. 2011.
- FANG, Y. et al. Effect of foliar application of zinc, selenium, and iron fertilizers on nutrients concentration and yield of rice grain in china. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Easton, v. 56, n. 6, p. 2079-2084, Mar. 2008.
- FERREIRA, D. F. Análises estatísticas por meio do Sisvar para Windows versão 4.0. In: REUNIÃO ANUAL DA REGIÃO BRASILEIRA DA SOCIEDADE

INTERNACIONAL DE BIOMETRIA, 45., 2000, São Carlos. **Anais...** São Carlos: UFSCAR, 2000. p. 255-258.

FERREIRA, K. S. et al. Concentrações de selênio em alimentos consumidos no Brasil. **Revista Panamericana de Salud Publica**, Washington, v. 11, n. 1, p. 172-177, 2002.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **FAO cereal supply and demand brief**. Rome, 2011. Disponível em: <<http://www.fao.org/worldfoodsituation/wfs-home/csdb/en/>>. Acesso em: 19 set. 2011.

HARTIKAINEN, H.; XUE, T. L.; PIIRONEN, V. Selenium as an antioxidant and pro-oxidant in ryegrass. **Plant and Soil**, The Hague, v. 225, n. 1, p. 193-200, Jan. 2000.

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, Nov. 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, v. 210, n. 1, p. 199-207, Feb. 1999.

KAPOLNA, E. et al. Effect of foliar application of selenium on its uptake and speciation in carrot. **Food Chemistry**, London, v. 115, n. 4, p. 1357-1363, Aug. 2009.

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

LUCCA, P.; POLETTI, S.; SAUTTER, C. Genetic engineering approaches to enrich rice with iron and vitamin A. **Physiologia Plantarum**, Copenhagen, v. 126, n. 3, p. 291-303, Mar. 2006.

LYONS, G. H. et al. Selenium increases seed production in Brassica. **Plant and Soil**, The Hague, v. 318, n. 1, p. 73-80, Feb. 2009.

- LYONS, G. H.; STANGOULIS, J. C. R.; GRAHAM, R. D. Exploiting micronutrient interaction to optimize biofortification programs: the case for inclusion of selenium and iodine in the HarvestPlus programs. **Nutrition Research Reviews**, Cambridge, v. 62, n. 6, p. 247-252, June 2004.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2. ed. Piracicaba: POTAFOS, 1997. 201 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, n. 1, p. 151-153, 1990.
- MORAES, M. F. et al. Evidences of selenium deficiency in Brazil: from soil to human nutrition. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SELENIUM IN THE ENVIRONMENT AND HUMAN HEALTH, 1., 2009, Suzhou. **Proceedings...** Suzhou: ICS, 2009. p. 73-74.
- MOUTA, E. R. et al. Adsorção de selênio em latossolos. **Revista Brasileira de Ciência de Solo**, Viçosa, MG, v. 32, n. 3, p. 1033-1041, maio/jun. 2008.
- PAZURKIEWICZ-KOCOT, K.; KITA, A.; PIETRUSZKA, M. Effect of selenium on magnesium, iron, manganese, copper, and zinc accumulation in corn treated by indole-3-acetic acid. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 39, n. 15/16, p. 2303-2318, Aug. 2008.
- PEDRERO, Z.; MADRID, Y.; CAMARA, C. Selenium species bioaccessibility in enriched radish (*Raphanus sativus*): a potential dietary source of selenium. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Easton, v. 54, n. 6, p. 2412-2417, Mar. 2006.
- PILON-SMITS, E.; QUINN, C. Selenium metabolism in plants. In: HELL, R.; MENDEL, R. R. (Ed.). **Cell biology of metal and nutrients**. Berlin: Springer, 2010. p. 225-241.
- POGGI, V. et al. Foliar application of selenite and selenate to potato (*Solanum tuberosum*): effect of a ligand agent on selenium content of tubers. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Easton, v. 48, n. 10, p. 4749-4751, Oct. 2000.
- RAMOS, S. J. et al. Selenium biofortification and antioxidant activity in lettuce plants fed with selenate and selenite. **Plant, Soil and Environment**, Praha, v. 12, n. 12, p. 583-587, Dec. 2010.

RAYMAN, M. P. The argument for increasing selenium intake. **Proceedings of the Nutrition Society**, Cambridge, v. 61, n. 2, p. 203-215, Apr. 2002.

RÍOS, J. J. et al. Biodortificação of Se and induction of the antioxidant capacity in lettuce plants. **Scientia Horticulturae**, Amsterdam, v. 116, n. 3, p. 248-255, May 2008.

_____. Nitrogen-use efficiency in relation to different forms and application rates of Se in lettuce plants. **Journal of Plant Growth Regulation**, Dordrecht, v. 29, n. 1, p. 164-170, Jan. 2010.

ROVIRA, M. et al. Sorption of selenium (IV) and selenium (VI) onto natural iron oxides: goethite and hematite. **Journal of Hazardous Materials**, Amsterdam, v. 150, n. 2, p. 279-284, Jan. 2008.

SILLANPÄÄ, M.; JANSSON, H. **Status of cadmium, lead, cobalt and selenium in soils and plants of thirty countries**. Rome: FAO, 1992. 358 p. (FAO Soils Bulletin, 65).

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.

SOUZA, R. F. **Dinâmica de fósforo em solos sob influência da calagem e adubação orgânica, cultivados com feijoeiro**. 2005. 141 p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2005.

TERRY, N. et al. Selenium in higher plants. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, Palo Alto, v. 51, p. 401-432, Sept. 2000.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. **Dietary reference intakes: elements**. Washington, 2003. Disponível em: <<http://www.iom.edu/Global/News%20Announcements/~media/48FAAA2FD9E74D95BBDA2236E7387B49.ashx>>. Acesso em: 18 jan. 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, Feb. 2009.

ZEMBALA, M. et al. Effect of selenium on macro- and microelement distribution and physiological parameters of rape and wheat seedlings exposed to cadmium stress. **Plant and Soil**, The Hague, v. 329, n. 1/2, p. 457-468, Apr. 2010.