

RESSALVA

Atendendo solicitação do(a) autor(a), o texto completo desta dissertação será disponibilizado somente a partir de 12/01/2019.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

HEITOR PONTES GESTAL REIS

**VARIAÇÃO GENOTÍPICA E BIOFORTIFICAÇÃO AGRONÔMICA COM
SELÊNIO EM ARROZ DE TERRAS ALTAS E RELAÇÕES COM A
QUALIDADE NUTRICIONAL DO GRÃO**

Ilha Solteira

2017



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de Ilha Solteira

HEITOR PONTES GESTAL REIS

**VARIAÇÃO GENOTÍPICA E BIOFORTIFICAÇÃO AGRONÔMICA COM
SELÊNIO EM ARROZ DE TERRAS ALTAS E RELAÇÕES COM A
QUALIDADE NUTRICIONAL DO GRÃO**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia – UNESP – Câmpus de Ilha Solteira, para obtenção do título de Mestre em Agronomia. Especialidade: Sistemas de Produção.

Prof. PhD. André Rodrigues dos Reis
Orientador

Ilha Solteira

2017

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

R375v Reis, Heitor Pontes Gestal.
Variação genotípica e biofortificação agronômica com selênio em arroz de terras altas e relações com a qualidade nutricional do grão / Heitor Pontes Gestal Reis. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2017
93 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Especialidade: Sistemas de Produção, 2017

Orientador: André Rodrigues Dos Reis
Inclui bibliografia

1. Biofortificação agronômica com selênio. 2. Qualidade nutricional de grãos de arroz. 3. Efeitos da variação genotípica no acúmulo de selênio.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Ilha Solteira

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Variação genotípica e biofortificação agronômica com selênio em arroz de terras altas e relações com a qualidade nutricional do grão.

AUTOR: HEITOR PONTES GESTAL REIS

ORIENTADOR: ANDRÉ RODRIGUES DOS REIS

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em AGRONOMIA, especialidade: SISTEMAS DE PRODUÇÃO pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. ANDRÉ RODRIGUES DOS REIS

Coordenadoria de Curso de Engenharia de Biosistemas / Câmpus Experimental de Tupã

Prof. Dr. ENES FURLANI JUNIOR

Departamento de Fitotecnia, Tecnologia de Alimentos e Sócio-Economia / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. FERNANDO FERRARI PUTTI

Engenharia de Biosistemas / Faculdade de Ciências e Engenharia de Tupã

Ilha Solteira, 12 de janeiro de 2017

DEDICO...

Aos meus pais, Hamilton Luis dos Reis e Rita de Cássia Pontes Gestal Reis, por sempre acreditarem no meu potencial, por todos os sacrifícios, apoio e suporte para lutar pelos meus objetivos, pelos ensinamentos valiosos a mim passados e por estarem sempre ao meu lado em todos os momentos da minha vida.

OFEREÇO...

A minha namorada Jéssica Pigatto de Queiroz Barcelos por todo apoio, amizade e companheirismo ao longo de todos esses anos, e também por todo amor, carinho, paciência e dedicação.

AGRADECIMENTOS

À Deus, por todas as bênçãos, paz, saúde e proteção concedidas, além de guiar e iluminar meus caminhos durante minha jornada.

À Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, em especial à Faculdade de Engenharia, campus de Ilha Solteira, por proporcionar excelentes condições de aprendizado aos alunos da instituição.

Aos professores do curso de Pós Graduação em Agronomia da UNESP - Ilha Solteira, pelo empenho e dedicação aos alunos desta universidade, sempre acreditando em um futuro melhor.

Ao meu orientador Prof. PhD. André Rodrigues dos Reis, pelo conhecimento transmitido, confiança, incentivo, paciência e pelas oportunidades manifesto minha gratidão pela grande contribuição em minha vida acadêmica e pessoal.

Ao Prof. Dr. Enes Furlani Junior e Prof. Fernando Ferrari Putti pelo suporte oferecido durante o desenvolvimento do projeto, pelo conhecimento transmitido, pela confiança e amizade.

Aos Professores Martin Broadley e Scott Young da Universidade de Nottingham-Inglaterra pela análise química do teor total de selênio nas amostras provenientes desse estudo.

Aos amigos Orlando Baltazar Junior, Fabricio Hausser, Vinícius Gomes, Pedro Malange, Kézia Tonhoque, Victor Coleta, Henrique Nardy pela amizade, paciência e por todas as boas memórias.

Aos colegas de trabalho Vinicius Martins, Amanda Paixão, Simone Hiraki, Carlos Sanches, Mirella dos Santos, Jailson Aguilar, Felipe Capobianco, Daniel Franchin, Pedro Ehrenberg, e a minha namorada Jéssica, os quais contribuíram para o desenvolvimento deste experimento.

Aos meus avós João Clarindo dos Reis e Lourdes Pigari dos Reis, Laor Antônio de Carvalho Pontes Gestal e Neusa Maria dos Santos Pontes Gestal, e à todos os meus tios e primos, em especial ao meu tio e padrinho Humberto Eduardo dos Reis pelo apoio e suporte dedicados a mim e a minha família.

À Fapesp pelo auxílio financeiro (Processo 2015/11690-3), indispensável para a execução deste experimento.

Enfim, a todos que estiveram juntos nesta caminhada e que de alguma forma contribuíram para a execução deste trabalho.

Variação genotípica e biofortificação agronômica com selênio em arroz de terras altas e relações com a qualidade nutricional do grão

RESUMO

O selênio (Se) é um importante elemento para humanos, animais e plantas, porém o Brasil, em geral, contém solos pobres desse elemento. O arroz é um dos produtos principais da dieta dos brasileiros, portanto a biofortificação agronômica com Se para essa cultura é uma estratégia para aumentar os níveis de Se na população. Pouco sabe-se sobre a variação genotípica no acúmulo de Se em plantas e da possibilidade de uso de plantas mais eficientes e responsivas a aplicação de Se ao solo. Neste trabalho, objetivou-se avaliar diferentes genótipos quanto ao acúmulo de Se e sua relação com a qualidade nutricional dos grãos, além de avaliar a influência do Se na fisiologia e bioquímica para um melhor entendimento da sua distribuição nas partes da planta. Para avaliar genótipos responsivos a adubação com Se, foram avaliados 3 genótipos de arroz de terras altas em condições de campo para avaliar o efeito de doses de Se (0; 10; 25; 50 e 100 g ha⁻¹) na qualidade nutricional do grão e fisiologia da planta. Para avaliar a influência do nitrogênio na eficiência de acumulação de Se em grãos de arroz de terras altas, foi realizado um estudo com 5 doses de nitrogênio (0, 20, 40, 80 e 120 kg ha⁻¹), 2 doses de Se (0 e 25 g ha⁻¹). No experimento I as cultivares ANa 5015 e AN Cambará se destacaram em relação a ANa 7007 nas variáveis biométricas. A biofortificação com Se promoveu aumento na atividade da redutase do nitrato. Nas menores doses de Se ativou o sistema antioxidativo pelo aumento da atividade da superóxido dismutase e catalase, e redução de peroxidação lipídica e peróxido de hidrogênio. Os teores de Se nas folhas e grãos aumentaram linearmente em função da aplicação do Se via solo. Houve correlação altamente significativa entre teor de Se nas folhas e grãos ($r = 0,99$, $p \leq 0,0001$), indicando alta translocação do nutriente da fonte para o dreno. A aplicação de 10 g ha⁻¹ proporcionou aumentos nos teores de Se nos grãos acima de 0,3 mg kg⁻¹, limite máximo permitido pelo *Codex Alimentarius*. No entanto, a ingestão diária aumentou até 30 µg dia⁻¹, ou seja abaixo da recomendação de ingestão diária de 55 µg dia⁻¹. No experimento II, observou-se aumento linear do índice SPAD (33 a 45), altura de plantas (66 a 82 cm), porcentagem de rendimento de grão (67 a 70%), porcentagem de grãos inteiros (58 a 64%) e produtividade (1280 a 2898 kg ha⁻¹) em resposta as doses aplicadas de N. Os teores de Se variaram de 0,01 a 0,54 mg kg⁻¹ nas folhas e 0,03 a 0,36 mg kg⁻¹ nos grãos. A ingestão diária de Se calculada proveniente do arroz biofortificado com Se variou de 2,05 a 24,7 µg dia⁻¹, o que representa um aumento de 3,72% para 44,9% da necessidade diária de Se por dia. Levando em consideração que a recomendação de ingestão diária de Se para adultos é de 55 µg dia⁻¹, o presente estudo apresenta informações relevantes sobre biofortificação agronômica para aumento do teor de Se nas partes comestíveis, o que pode resultar em benefícios na saúde humana.

Palavras chave: biofortificação agronômica, fertilizantes, saúde humana, selenato de sódio

Genotypic variation and agronomic biofortification of upland rice with selenium and its relation to grain quality

ABSTRACT

Selenium (Se) is an important element for humans, animals and plants, however, there are evidences of Se deficiency in Brazilian soils. Rice is one of the main edible crop in the Brazilian diet, so the agronomic biofortification with Se can be a good strategy to increase Se levels in Brazilian population. There is a lack of information about the genotypic variation on Se accumulation in rice plants and the possibility to screen more efficient and responsive plants to selenium supply. The aim of this study is to evaluate the genotypic differences on Se accumulation and its relationship to nutritional quality of grains. Field experiments were conducted to evaluate the effect of Se levels application (0, 10, 25, 50 and 100 g ha⁻¹) on tree rice genotypes and its relations to grain nutritional quality. In addition, to evaluate the possible interaction between nitrogen and Se metabolism, an experiment was conducted containing five nitrogen levels (0, 20, 40, 80 and 120 kg ha⁻¹), and 2 levels of selenium (0 and 25 g ha⁻¹). There was a linear increase on SPAD index (33 to 45), plant height (66 to 82 cm), percentage of grain yield (67 to 70 %), percentage of whole grains (58 to 64 %) and rice yield (1.280 to 2.898 kg ha⁻¹) in response to levels of N application. The total Se content ranged from 0.01 to 0.54 mg kg⁻¹ in the leaves and 0.03 to 0.36 mg kg⁻¹ in the grains. The calculated daily intake of Se from the biofortified rice grains ranged from 2.05 to 24.7 µg day⁻¹, which represent an increase from 3.72% to 44.9 % of the daily requirement of Se per day. Despite that the recommendation for daily Se intake for adults is 55 µg day⁻¹, the present study show relevant information on agronomic biofortification to increase Se content in edible parts, which can benefits human health.

Keywords: agronomic biofortification, fertilizers, human health, sodium selenate.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I

Importância da biofortificação agrônômica e acúmulo de selênio em plantas

CAPÍTULO II

Efeito da variação genotípica no acúmulo de selênio em arroz de terras altas

Figura 1	- Dados Climáticos da área experimental durante a fase de semeadura e colheita do experimento na Fazenda de Ensino Pesquisa e Extensão da UNESP, Selvíria-MS.....	32
Figura 2	- Índice SPAD das cultivares de arroz de terras altas Ana 7007, AN Cambará e ANa 5015 em resposta a aplicação de Se.....	38
Figura 3	- Altura de plantas (a), porcentagem de grãos quebrados (b), rendimento de benefício (c) e produtividade (d). das cultivares de arroz de terras altas Ana 7007, AN Cambará e ANa 5015 em resposta a aplicação de Se.....	41
Figura 4	- Atividade da redutase do nitrato (a), e da urease (b) no tecido foliar das cultivares de arroz de terras altas Ana 7007, AN Cambará e ANa 5015 em resposta a aplicação de Se.....	43
Figura 5	- Conteúdo de MDA (a), H ₂ O ₂ (b), atividade da SOD (c), CAT (d) e proteína foliar total (e) no tecido foliar das cultivares de arroz de terras altas Ana 7007, AN Cambará e ANa 5015 em resposta a aplicação de Se.....	46
Figura 6	- Ingestão diária de Se (µg/dia), de acordo com o consumo médio de arroz pela população brasileira, das cultivares de arroz de terras altas Ana 7007, AN Cambará e ANa 5015 em resposta a aplicação de Se.....	55
Figura 7	- Teores de albumina (a), globulina (b), glutelina (c), prolamina (d) e proteína total (e) nos grãos das cultivares de arroz de terras altas Ana 7007, AN Cambará e ANa 5015 em resposta a aplicação de Se.....	60

CAPÍTULO III

Influência do nitrogênio na eficiência de acumulação de Se em grãos de arroz de terras altas

Figura 1	- Dados Climáticos da área experimental durante a fase de semeadura e colheita do experimento na Fazenda de Ensino Pesquisa e Extensão da UNESP, Selvíria-MS.....	70
Figura 2	- Índice SPAD (a), altura de plantas (b), rendimento de benefício (c), porcentagem de grãos inteiros (d), porcentagem de grãos quebrados (e) e produtividade (e) em resposta a aplicação de doses de N na presença ou não de Se na cultivar de arroz de terras altas ANa 5015.....	78

Figura 3	- Conteúdo de MDA (a), conteúdo de proteína foliar total (b), atividade da CAT (c) e SOD (d) no tecido foliar em resposta a aplicação de doses de N na presença ou não de Se na cultivar de arroz de terras altas ANa 5015.....	81
Figura 4	- Ingestão diária de Se ($\mu\text{g}/\text{dia}$) proveniente do arroz biofortificado com Se em resposta a adubação nitrogenada.....	87

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO I

Importância da biofortificação agrônômica e acúmulo de selênio em plantas

Tabela 1	- Teores totais de Se em alguns solos do Brasil.....	17
Tabela 2	- Variação genotípica na acumulação de selênio por diversas culturas.....	20
Tabela 3	- Energia, macronutrientes e fibra na composição de alimentos por 100 gramas de parte comestível.....	22
Tabela 4	- Prevalência de consumo alimentar segundo os brasileiros nos anos de 2008/2009.....	22

CAPÍTULO II

Efeito da variação genotípica no acúmulo de selênio em arroz de terras altas

Tabela 1	- Teores de macronutrientes e selênio no tecido foliar das cultivares de arroz de terras altas Ana 7007, AN Cambará e ANa 5015 em resposta a aplicação de Se.....	50
Tabela 2	- Teores de micronutrientes no tecido foliar das cultivares de arroz de terras altas Ana 7007, AN Cambará e ANa 5015 em resposta a aplicação de Se.....	51
Tabela 3	- Teores de macronutrientes e selênio nos grãos das cultivares de arroz de terras altas Ana 7007, AN Cambará e ANa 5015 em resposta a aplicação de Se.....	56
Tabela 4	- Teores de micronutrientes nos grãos das cultivares de arroz de terras altas Ana 7007, AN Cambará e ANa 5015 em resposta a aplicação de Se.....	57

CAPÍTULO III

Influência do nitrogênio na eficiência de acumulação de Se em grãos de arroz de terras altas

Tabela 1	- Teores de nutrientes no tecido foliar em resposta a aplicação de doses de N na presença ou não de Se na cultivar de arroz de terras altas ANa 5015.....	83
Tabela 2	- Teores de nutrientes nos grãos em resposta a aplicação de doses de N na presença ou não de Se na cultivar de arroz de terras altas ANa 5015.....	86

SUMÁRIO

CAPÍTULO I IMPORTÂNCIA DA BIOFORTIFICAÇÃO AGRONÔMICA E ACÚMULO DE SELÊNIO EM PLANTAS

1.1	INTRODUÇÃO.....	14
1.2	REVISÃO DE LITERATURA.....	15
1.2.1	IMPORTÂNCIA DO SELÊNIO E DA BIOFORTIFICAÇÃO AGRONÔMICA.....	15
1.2.2	DISPONIBILIDADE DE SELÊNIO.....	16
1.2.3	CLASSIFICAÇÃO DE PLANTAS EM FUNÇÃO DO ACÚMULO DE SELÊNIO.....	18
1.2.4	ABSORÇÃO DO SELÊNIO PELAS RAÍZES.....	18
1.2.5	TRANSPORTE E METABOLISMO DE SELÊNIO EM PLANTAS.....	19
1.2.6	VARIAÇÃO GENOTÍPICA DO ACÚMULO DE SELÊNIO EM PLANTAS.....	19
1.2.7	IMPORTÂNCIA DO ARROZ NA DIETA DA POPULAÇÃO BRASILEIRA.....	21
	REFERÊNCIAS.....	24

CAPÍTULO 2 EFEITO DA VARIAÇÃO GENOTÍPICA NO ACÚMULO DE SELÊNIO EM ARROZ DE TERRAS ALTAS

2.1	INTRODUÇÃO.....	31
2.2.	MATERIAL E MÉTODOS.....	31
2.2.1	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL.....	31
2.2.2	DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E TRATAMENTOS.....	33
2.2.3	INSTALAÇÃO E CONDUÇÃO DO EXPERIMENTO.....	33
2.2.4	VARIÁVEIS ANALISADAS.....	33
2.2.4.1	<i>Avaliações de crescimento e produtividade.....</i>	<i>33</i>
2.2.4.2	<i>Análise nutricional.....</i>	<i>34</i>
2.2.4.3	<i>Índice de clorofila.....</i>	<i>34</i>
2.2.4.4	<i>Análises enzimáticas.....</i>	<i>34</i>
2.2.4.4.1	<i>Coleta do material.....</i>	<i>34</i>
2.2.4.4.2	<i>Atividade da urease (EC 3.5.1.5).....</i>	<i>35</i>
2.2.4.4.3	<i>Atividade da redutase do nitrato.....</i>	<i>35</i>
2.2.4.4.4	<i>Conteúdo de peróxido de hidrogênio.....</i>	<i>35</i>
2.2.4.4.5	<i>Peroxidação lipídica.....</i>	<i>36</i>
2.2.4.4.6	<i>Extração de proteínas e enzimas antioxidantes.....</i>	<i>36</i>
2.2.4.4.7	<i>Determinação de proteínas.....</i>	<i>36</i>
2.2.4.4.8	<i>Superóxido Dismutase (SOD, EC 1.15.1.1).....</i>	<i>37</i>
2.2.4.4.9	<i>Catalase (CAT, 1.11.1.6).....</i>	<i>37</i>
2.2.5	ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	37
2.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	38
2.3.1	PARÂMETROS FITOTÉCNICOS.....	38
2.3.2	ENZIMAS DO CICLO DO NITROGÊNIO.....	41
2.3.3	TEOR PROTEICO E ENZIMAS ANTIOXIDATIVAS.....	43
2.3.4	AVALIAÇÃO NUTRICIONAL DO TECIDO FOLIAR.....	47

2.3.5	AVALIAÇÃO NUTRICIONAL DOS GRÃOS.....	52
2.3.6	QUALIDADE NUTRICIONAL DOS GRÃOS.....	58
2.4	CONCLUSÃO.....	61
	REFERÊNCIAS.....	62

CAPÍTULO 3 - INFLUÊNCIA DO NITROGÊNIO NA EFICIÊNCIA DE ACUMULAÇÃO DE SE EM GRÃOS DE ARROZ DE TERRAS ALTAS

3.1	INTRODUÇÃO.....	67
3.2.	MATERIAL E MÉTODOS.....	69
3.2.1	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL.....	69
3.2.2	DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E TRATAMENTOS.....	70
3.2.3	INSTALAÇÃO E CONDUÇÃO DO EXPERIMENTO.....	71
3.2.4	VARIÁVEIS ANALISADAS.....	71
3.2.4.1	Avaliações de crescimento e produtividade.....	71
3.2.4.2	Análise nutricional.....	72
3.2.4.3	Índice de clorofila.....	72
3.2.4.4	Análises enzimáticas.....	72
3.2.4.4.1	<i>Coleta do material</i>	72
3.2.4.4.2	<i>Atividade da urease (EC 3.5.1.5)</i>	73
3.2.4.4.3	<i>Atividade da redutase do nitrato</i>	73
3.2.4.4.4	<i>Conteúdo de peróxido de hidrogênio</i>	73
3.2.4.4.5	<i>Peroxidação lipídica</i>	74
3.2.4.4.6	<i>Extração de proteínas e enzimas antioxidantes</i>	74
3.2.4.4.7	<i>Determinação de proteínas</i>	75
3.2.4.4.8	<i>Superóxido Dismutase (SOD, EC 1.15.1.1)</i>	75
3.2.4.4.9	<i>Catalase (CAT, 1.11.1.6)</i>	75
3.2.5	ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	75
3.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	76
3.3.1	PARÂMETROS FITOTÉCNICOS.....	76
3.3.2	TEOR PROTEICO E ENZIMAS ANTIOXIDATIVAS.....	79
3.3.3	AVALIAÇÃO NUTRICIONAL DO TECIDO FOLIAR.....	81
3.3.4	AVALIAÇÃO NUTRICIONAL DOS GRÃOS.....	84
3.4	CONCLUSÃO.....	88
	REFERÊNCIAS.....	89

CAPÍTULO I

Importância da biofortificação agrônômica e acúmulo de selênio em plantas

1.1 INTRODUÇÃO

O selênio (Se) é um elemento essencial para a saúde humana. Organismos que apresentam deficiência desse nutriente ficam mais suscetíveis a vários tipos de doenças, como o hipertireoidismo, doenças cardiovasculares e câncer (RAYMAN et al., 2012). Estima-se que 1 bilhão de pessoas apresentam deficiência de selênio (WHITE, 2016).

Como grande parte do Se na dieta humana é derivado, direta ou indiretamente a partir de plantas comestíveis, a deficiência de Se na dieta humana é geralmente atribuída à produção agrícola em solos com baixo teor desse elemento (JOY et al., 2015). A biofortificação agrônômica, que é baseada na aplicação de fertilizantes via solo ou foliar contendo Se, tem sido um método efetivo para aumentar a concentração desse micronutriente em culturas utilizadas para alimentação, aumentando o teor de Se na dieta e melhorando a saúde de animais e seres humanos (ALFTHAN et al., 2015).

Existem fortes evidências de deficiência de selênio (Se) em solos, forragens e produtos agrícolas do Brasil. A faixa de deficiência de Se em solos varia de 100 a 600 $\mu\text{g kg}^{-1}$, no entanto, os valores máximos encontrados, na maioria dos casos, em solos agricultáveis foram aproximadamente 210 $\mu\text{g kg}^{-1}$. A variação genotípica das culturas para acumular Se nas partes comestíveis depende do seu teor no solo e a escolha da variedade ou cultivar com maior capacidade de absorção e acúmulo de Se pode contribuir para melhorar a qualidade dos alimentos. O Brasil possui fortes evidências de deficiência de Se na população, no entanto, nenhuma pesquisa sobre o assunto está disponível (REIS et al., 2014).

Existem duas estratégias de biofortificação visando incrementar o Se ingerido por humanos: a primeira estratégia é aumentar diretamente a ingestão do nutriente, seja por suplementações para animais, por fortificação de alimento direta ou por suplementação com pílulas de Se. Já para a segunda é a estratégia de atividades agrônômicas como melhoramento de plantas e adubação são utilizadas para aumentar o teor de Se em culturas alimentares. Qual estratégia é mais eficiente depende das propriedades naturais e socioeconômicas, dos sistemas alimentícios e agroecológicos de cada local (MILLER e WELCH 2013).

A eficiência da adubação com Se depende da forma de Se utilizado, da dose do adubo, da tecnologia de aplicação empregada e das propriedades do solo, sendo que a eficiência de

absorção pode variar de 1% até 50% (LONGCHAMP et al., 2012; KIKKERT et al., 2013). No entanto, estima-se que em média o aproveitamento do Se aplicado é de 5% (HAUG et al., 2007).

Portanto existe a necessidade de se estabelecer doses de Se a serem aplicadas, pois o limite máximo permitido pelo Codex Alimentarius da concentração de Se em alimentos é de 0,3 mg kg⁻¹ (CHILIMBA et al., 2012), já que a toxidez de Se em humanos resulta em um sintoma conhecido como selenose, que é caracterizado pelo apodrecimento de unhas e queda de cabelos (RAYMAN et al., 2012). Assim, o presente trabalho teve por objetivo estabelecer uma recomendação de adubação com selênio para a cultura do arroz de terras altas, além de estudar os efeitos da variação genotípica no acúmulo deste nutriente e também identificar a influência deste elemento no metabolismo do nitrogênio.

1.2 REVISÃO DE LITERATURA

1.2.1 IMPORTÂNCIA DO SELÊNIO E DA BIOFORTIFICAÇÃO AGRONÔMICA

Segundo estimativa de Combs Junior (2001) acredita-se que haja de 0,5 a 1,0 bilhão de pessoas com provável carência de Se. Também tem sido levantado que 2 bilhões de pessoas no mundo estão ingerindo quantidade insuficiente de iodo (I), ao passo que mais de 800 milhões de pessoas são consideradas deficientes desse nutriente (ZIMMERMANN, 2009; LEAL et al., 2012). Há poucas informações sobre selênio no Brasil, todavia são grandes as evidências de deficiência desse micronutriente em algumas regiões do país, conforme estudos avaliando-se teores de Se em solos, produtos agrícolas e dietas (MORAES et al., 2009).

Até o momento a adição de Se em áreas agrícolas juntamente com fertilizantes NPK parece ser a forma efetiva e segura de contornar a problemática da deficiência desse micronutriente na alimentação humana e animal, conforme resultados de décadas de acompanhamento em programas realizados em países do Norte da Europa, ex. Finlândia (HARTIKAINEN, 2005; HAUG et al., 2007; ALFTHAN et al., 2015). Após a adoção dos programas, houve grande redução dos índices de mortalidade, principalmente em relação a doenças do coração, câncer e incidência de deficiência de vitamina E. Uma nutrição adequada em Se também ajuda a reduzir o hipertireoidismo (bócio), uma vez que Se faz parte de uma enzima chave no metabolismo da tireóide.

A desnutrição é consequência da alta ingestão de alimentos básicos (arroz, milho e trigo), pobres em minerais e vitaminas, especialmente ferro (Fe) e zinco (Zn), sendo que a

maior parte desses micronutrientes é removido por moagem. Isto é comum em países de regiões em desenvolvimento, como Ásia, África e América Latina, onde os cereais fazem parte da dieta básica da população (DIBB et al., 2005; BORRILL et al., 2014).

A suplementação da ração de animais com Se é uma possível estratégia para aumentar os níveis de Se na população. Na Finlândia, foi observado um aumento do conteúdo de Se na alimentação após a introdução da suplementação em Se para animais, além disso, a adição de selênio em fertilizantes NPK para uso em culturas e pastagens também tem se mostrado um método efetivo para aumentar o nível de Se na população (ALFTHAN et al., 2015). No mundo existe uma variabilidade substancial em cereais quanto aos teores de Zn, Fe e outros nutrientes (GRAHAM et al., 2007).

1.2.2 DISPONIBILIDADE DE SELÊNIO

O Se é um elemento considerado escasso, com distribuição bastante irregular na crosta terrestre e, além do material de origem, seu teor no solo depende fortemente do regime hídrico de cada região (HAUG et al., 2007). Os teores de Se nos produtos agrícolas alimentares são fortemente dependentes da presença deste elemento no solo e também da regulação em função espécie/genótipo vegetal, embora devido ao pouco número de trabalhos realizados haja dúvidas quanto à significância agrônômica da variação/regulação genotípica em sua acumulação nas plantas cultivadas (LYONS et al., 2005; KOPSELL e KOPSELL, 2006).

A concentração e as formas químicas de Se em solos naturais são determinadas principalmente pela geologia (PILBEAM et al., 2015). As concentrações de selênio na maioria dos solos encontram-se na faixa de 0,01-2,0 mg kg⁻¹ Se, mas solos associados com determinadas características geológicas podem atingir concentrações de 1.200 mg Se kg⁻¹ (PILBEAM et al., 2015). As concentrações de Se em solos jovens são tóxicas para muitas plantas e suportam uma flora particular (ROSENFELD e BEATH, 1964; BROWN e SHRIFT, 1982). Solos seleníferos estão geralmente nas Grandes Planícies dos EUA, Canadá, América do Sul, Austrália, Índia, China e Rússia (PILBEAM et al., 2015).

Embora haja poucos trabalhos de pesquisa sobre selênio no Brasil, os relatos anteriores e os resultados de análise de Se em alguns solos (Tabela 2) evidenciam possíveis regiões com deficiência desse importante micronutriente, sugerindo a necessidade de mais pesquisas para confirmação e tomada de decisões em relação a essa provável deficiência. Considera-se como deficientes teores de Se <100 µg kg⁻¹ em forragens e <50 µg kg⁻¹ para

grãos de cereais. A ingestão de alimentos com teores abaixo desta faixa podem gerar problemas de deficiência, causando doenças em humanos e animais (GISSEL-NIELSEN et al., 1984).

Tabela 1 - Teores totais de Se em alguns solos do Brasil.

Local amostrado	Teores ($\mu\text{g kg}^{-1}$)	Referência
São Paulo	0 – 800	PAIVA NETO& GARGANTINI (1956)
Goiás	1 – 8	FICHTNER et al. (1990)
São Paulo	38 - 212*	ANNO (2001)
Nova Odessa – SP	130*	ZANETTI, M.A.**
São Paulo	68 – 220	FARIA (2009)
Cerrado brasileiro	10 – 80	CARVALHO (2011)
Faixa de teores deficientes	100 - 600	LYONS et al. (2003)

*Teores em mg dm^{-3} ; ** Comunicação pessoal - Prof. Marcus Antonio Zanetti (USP - Pirassununga, SP).

Fonte: elaboração do próprio autor

Existem várias barreiras que precisam ser melhores compreendidas para seleção de plantas visando a maiores acúmulos de micronutrientes (Fe, Zn e Se) nas partes comestíveis (WELCH, 2001). Essas barreiras são resultado do fino controle dos mecanismos homeostáticos que regulam a absorção, translocação e redistribuição de metais em plantas, permitindo acúmulo de níveis adequados, mas não-tóxicos nos tecidos vegetais.

O Selenato (SeO_4^{2-}) é a principal forma de Se solúvel em água em solos oxissolos, que incluindo solos mais cultivadas, ao passo que o selenito (SeO_3^{2-}) predomina, em solos anaeróbicos com um pH de neutro a ácido, tais como solos de várzea (MIKKELSEN et al., 1989; FORDYCE, 2013). Espécies de selenito (Se^{2-}) são estáveis somente sob condições redox baixas, e raramente estão presentes em solos cultivados. O selenato é relativamente móvel na solução do solo, mas o selenito é fortemente adsorvido por óxidos e hidróxidos de ferro e de alumínio, e em menor extensão, por argilas e matéria orgânica (FORDYCE, 2013; PILBEAM et al., 2015). Portanto a adição de selenato no solo facilita o acúmulo imediato de Se pelas plantas, enquanto o selenito fornece um fertilizante com uma liberação mais lenta de Se (BROADLEY et al., 2006; FORDYCE, 2013; PILBEAM et al., 2015).

1.2.3 CLASSIFICAÇÃO DE PLANTAS EM FUNÇÃO DO ACÚMULO DE SELÊNIO

A disponibilidade de Se no solo determina a ecologia das plantas. A maioria das plantas não podem crescer em solos seleníferos. A maioria das plantas que crescem em solos seleníferos acumulam menos de 100 mg Se kg⁻¹ de matéria seca e não toleram grandes concentrações de Se no seu tecido. No entanto, algumas espécies de plantas têm evoluído quanto a tolerância ao Se, e geralmente acumulam em seus tecidos concentrações superiores a 100 mg de matéria seca Se kg⁻¹. Estas plantas são consideradas acumuladoras de Se. Algumas espécies podem ainda acumular concentrações de 1.000-15.000 mg Se kg⁻¹ de matéria seca, e são chamadas de hiperacumuladoras de Se(ex:*Stanleya pinnata*) (WHITE, 2016).

O selênio não é considerado um elemento essencial para plantas (angiospermas), embora seja considerado um elemento benéfico, uma vez que pode estimular o crescimento, conferir tolerância a fatores ambientais que induzem o stress oxidativo, e proporciona resistência a patógenos e herbívoros (QUINN et al., 2007; PILON-SMITS et al., 2009; WHITE & BROWN, 2010; EL MEHDAWI & PILON-SMITS, 2012; FENG et al., 2013). As angiospermas foram divididas em três tipos ecológicos de acordo com a sua capacidade de acumular Se em seus tecidos, sendo não acumuladoras, acumuladoras e hiperacumuladoras selênio (ROSENFELD & BEATH, 1964; BROWN & SHRIFT, 1982; WHITE et al., 2007; WHITE, 2016).

Plantas hiperacumuladoras possuem algumas modificações que permitem acúmulo elevado de Se, como: expressão gênica diferenciada para transportadores de alta afinidade ao Se/Enxofre(S) na raiz (SCHIAVON et al., 2015). Alguns desses transportadores possuem modificações em sua sequência de aminoácidos (CABANNES et al., 2011). E acredita-se que esses transportadores modificados são seletivos ao Se em plantas hiperacumuladoras de Se e seletivos ao S nas demais plantas (WHITE, 2016).

1.2.4 ABSORÇÃO DO SELÊNIO PELAS RAÍZES

As raízes das plantas podem absorver Se na forma de selenato, selenito ou compostos orgânicos, como selenometionina (SeMet) e selenocisteína (SeCys), porém são incapazes de absorver Se na forma coloidal ou de metais selenidos. A absorção de Se pelas células das raízes da rizosfera é catalisada por transportadores de sulfato de alta afinidade (HASTs), homólogos com os transportadores de *Arabidopsis* (*Arabidopsis thaliana* [L.] Heynh.) AtSULTR1;1 e AtSULTR1;2. Em *Arabidopsis*, o transportador AtSULTR1; 1 contribui pouco para a absorção de selenato em plantas com teores elevados de S, mas a sua

contribuição é significativamente maior quando as plantas apresentam deficiência de S. Transportadores de fosfato, como o de arroz OsPT2, catalisam a absorção de HSeO_3^- , e homólogos do canal de aquaporina de arroz OsNIP2;1 (ZHANG et al, 2014.) catalisam a absorção de H_2SeO_3 (POMMERENIG et al., 2015). Transportadores que catalisam a absorção e a movimentação de cisteína e metionina pelas plantas podem transportar selenocisteína e selenometionina (TEGEDER, 2012).

1.2.5 TRANSPORTE E METABOLISMO DE SELÊNIO EM PLANTAS

Transportadores de sulfato de baixa afinidade homólogos de arábido (*AtSULTR2;1*, *AtSULTR2;2* e *AtSULTR3;5*) possuem relação com o transporte de Se na forma de selenato pelo xilema das plantas (TAKAHASHI et al., 2000; GIGOLASHVILI & KOPRIVA, 2014).

O selenito é rapidamente convertido em compostos orgânicos de selênio na raiz, enquanto que o selenato é imediatamente transportado no xilema (WHITE et al., 2004; XIMENEZ-EMBÚN et al., 2004). Os transportadores de sulfato homólogos à arábido *AtSULTR2;1*, *AtSULTR2;2* and *AtSULTR3;5* têm sido utilizados no transporte de selenato a longa distância no xilema (TAKAHASHI et al., 2000; GIGOLASHVILI & KOPRIVA, 2014). O selênio também é transportado, de forma muito limitada, como SeMet e óxido de Se de selenometionina (SeOMet) no xilema (LI et al., 2008). Em arábido, os transportadores de sulfato de baixa afinidade *AtSULTR2;1* e *AtSULTR2;2* catalisam a captação de selenato em células, enquanto que *AtSULTR3;5* aparentemente modula a atividade do *AtSULTR2;1*, mas não catalisa o próprio transporte (KATAOKA et al., 2004). A expressão de *AtSULTR2;1*, *AtSULTR2;2* e os seus homólogos em outras plantas é induzida pela deficiência de S e pelo aumento da disponibilidade de Se (TAKAHASHI et al., 2000, BUCHNER et al., 2004, VAN HOEWYK et al., 2005, GIGOLASHVILI & KOPRIVA, 2014).

1.2.6 VARIAÇÃO GENOTÍPICA DO ACÚMULO DE SELÊNIO EM PLANTAS

A biofortificação baseia-se no uso das variações genotípicas, intra e interespecíficas, no melhoramento de plantas visando à obtenção de produtos agrícolas alimentares com maior disponibilidade de nutrientes e vitaminas nas partes comestíveis (WELCH et al., 2008; BORRILL et al., 2014). As poucas pesquisas com esse foco são recentes no meio científico brasileiro e tem despertado interesse devido ao seu potencial de aplicação na melhoria da

qualidade dos alimentos, além de avaliar a variação genotípica quanto à acumulação de selênio em plantas cultivadas (Tabela 2).

Tabela 2 - Variação genotípica na acumulação de selênio por diversas culturas.

Tipo de planta	Nº variedades	Variação ($\mu\text{g kg}^{-1}$)	Autor(es)
Festuca – pastagem	15	82 -147	McQUINN et al. (1991)
Pimentão	24	133 - 1.197	GOLUBKINA et al.(2000)
Soja (grãos)	06	12 – 45	YANLING et al. (2002)
Trigo (grãos)	100	9 – 244	LYONS et al. (2005)
Trigo (grãos)	40	37 – 120	LYONS et al. (2005)
Trigo (grãos)	175	33-440	ZHAO et al. (2009)
Trigo (grãos)	42	24-116	BONA et al. (2009)
Triticale (grãos)	96	22-140	BONA et al. (2009)
Arroz (grãos)	151	29 – 103	ZHANG et al. (2006)
Arroz (grãos)	35	15 – 122	MORAES et al. (2009)
Brócolis – híbridos	20	50 – 95	FARNHAM et al. (2007)
Brócolis – linhagens	15	34 – 89	FARNAHM et al. (2007)

Fonte: elaboração do próprio autor

Sabe-se que a biofortificação visa produzir variedades melhoradas que apresentam maior conteúdo de minerais e vitaminas, complementando as intervenções em nutrição existentes, com o objetivo de proporcionar uma maneira sustentável e de baixo custo para alcançar as populações com limitado acesso aos sistemas formais de mercado e de saúde (REIS et al., 2013; ÁVILA et al., 2014). Variedades biofortificadas apresentam o potencial de fornecer benefícios contínuos, ano após ano, nos países em desenvolvimento, a um custo recorrente inferior ao da suplementação e da fortificação pós-colheita (WELCH, 2001; HARVESTPLUS, 2004; GRAHAM et al., 2007).

O entendimento dos fatores envolvidos na variação genotípica quanto ao acúmulo de Se e sua interação com a resposta das culturas ao Se como fertilizante poderá fornecer subsídios para posterior uso dessas informações no melhoramento vegetal, na nutrição mineral e adubação e na produção de alimentos de melhor qualidade nutricional.

Além da grande variação que existe entre espécies quanto a sua capacidade de acumular Se em seus tecidos, também há uma frequentemente variação significativa entre os

genótipos de uma espécie. Observou-se, por exemplo, que os tipos das espécies hiperacumuladoras de Se, *Stanleya pinnata* (FEIST e PARKER, 2001; CAPPA et al., 2014) e *Symphotrichum ericoides* (L.) GLNesom (EL MEHDAWI et al., 2015) diferem significativamente na concentração de Se na folha quando cultivadas no mesmo ambiente.

O Se pode aumentar o crescimento e melhorar o estado nutricional de plantas vasculares (TERRY et al., 2000; GRAHAM et al., 2007). Ainda é pouco conhecido o papel na formação de grãos, mas Seregina et al. (2001) comprovaram a interação de Se com N no aumento da produtividade de trigo. Os resultados, porém, foram variáveis conforme a cultivar utilizada. Tal fato demonstra a importância da variação genotípica para o acúmulo de nutrientes como o Se.

1.2.7 IMPORTÂNCIA DO ARROZ NA DIETA DA POPULAÇÃO BRASILEIRA

Os alimentos são a fonte primária de nutrientes, e sua demanda cresce com o aumento da população mundial. Em 1800, havia um bilhão de habitantes no planeta Terra. Atualmente, crescendo a uma taxa média de 1,37%, a população mundial é de 7,2 bilhões de habitantes (GERLAND, 2014). Para 2100, estima-se que a população mundial atinja 12,3 bilhões de pessoas (GERLAND, 2014). Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a população brasileira aumentou em 10 vezes no período de 1900 a 2000, passando de 17,4 milhões de pessoas para aproximadamente 170 milhões. Atualmente, a população brasileira é de 203 milhões e, em 2050, estima-se que haverá 260 milhões de brasileiros (IBGE, 2015).

A produção de cereais tem mantido a mesma taxa do crescimento populacional. De acordo com estimativas de Ray et al. (2013), até 2050 a produção de alimentos deverá crescer de 60 a 110% para atender a crescente demanda global por alimentos, e ainda, de acordo com a FAO (2013), durante os anos de 2012/2013, o consumo estimado de arroz foi de 67,7 Kg/pessoa. Por outro lado, a desnutrição tem aumentado, atingindo quase metade da população mundial, especialmente mulheres grávidas, adolescentes e crianças (WELCH, 2001; GRAHAM et al., 2007). Isso se deve, em parte, ao melhoramento genético vegetal voltado para ganho em produtividade e, dessa forma, apresentando relação inversa ao conteúdo de minerais nos grãos (GARVIN et al., 2006; MURPHY et al., 2008).

O arroz está entre os cereais mais consumidos do mundo. É capaz de suprir 20% da energia, devido às altas concentrações de carboidratos, e 15% da proteína da necessidade diária de um adulto, além de conter vitaminas e sais minerais, como o fósforo, cálcio e ferro,

segundo a Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO). Possui baixo teor de lipídeos, constituindo alimento importante para o equilíbrio alimentar e nutricional (WALTER et al, 2008).

Tabela 3 - Energia, macronutrientes e fibra na composição de alimentos por 100 gramas de parte comestível.

Descrição do alimento	Energia (Kcal)	Proteína (g)	Lipídios totais (g)	Carboidrato (g)	Fibra alimentar total (g)
Arroz (polido, parboilizado, agulha, agulhinha, etc..)	135,62	2,50	1,20	27,78	1,55
Arroz integral	130,95	2,56	1,97	25,56	2,72

Fonte: Adaptado de IBGE, 2011a.

Entre os alimentos tradicionalmente presentes no cardápio das famílias brasileiras, o arroz polido encontra-se em 1º lugar (84%) na prevalência de consumo segundo os alimentos (Tabela 4). O arroz integral é menos consumido, ficando em 44º lugar (3,7%) (IBGE, 2011b).

Tabela 4 - Prevalência de consumo alimentar segundo os brasileiros nos anos de 2008/2009.

Alimento	Prevalência de consumo (%)
Arroz	84,0
Café	79,0
Feijão	72,8
Pão	63,0
Carne bovina	48,7
Sucos/refrescos/sucos em pó reconstituídos	39,8
Óleos e gorduras	37,8
Aves	27,0
Refrigerantes	23,0
Macarrão e preparações à base de macarrão	18,8

Fonte: adaptado de IBGE, 2011b.

A busca pelo aumento do teor de Se na parte comestível das plantas pode provocar mudanças no metabolismo e estado nutricional das culturas, visto que o Se interfere no metabolismo de enxofre e, provavelmente, indiretamente afete também todo o metabolismo de nitrogênio (WHITE et al., 2004; RÍOS et al., 2010) e produtividade de grãos (NAWAZ et

al., 2015). A adição de Se, via fertilizantes, está envolvida na melhoria da qualidade dos produtos agrícolas. A biofortificação agrônômica com Se aumenta o teor de selenocisteína e selenometionina, as quais são substâncias essenciais para a saúde humana e animal (RAYMAN, 2012). Portanto, faz-se necessário conhecer melhor a influência do acúmulo de Se e sua influência no metabolismo de nitrogênio, na síntese de açúcares, teores de aminoácidos essenciais, bem como na qualidade nutricional do arroz por ser o principal alimento da dieta brasileira.

REFERÊNCIAS

- ALFTHAN, G.; EUROLA, M.; EKHOLM, P.; VENÄLÄINEN, E.; ROOT, T.; KORKALAINEN, K.; HARTIKAINEN, H.; SALMINEN, P.; HIETANIEMI, V.; ASPILA, P.; ARO, A. Effects of nationwide addition of selenium to fertilizers on foods, and animal and human health in Finland: From deficiency to optimal selenium status of the population. **Journal of Trace Elements in Medicine and Biology**. Muenchen, v. 31, p. 142-147, 2015.
- ANNO, R. M. **Determinação de selênio em solos e pastagens**. 2001. 30 f. Trabalho de conclusão do curso (Graduação em Zootecnia) - Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo - USP, Pirassununga, 2001.
- ÁVILA, F.W.; YANG, Y.; FAQUIN, V.; RAMOS, S.J.; GUILHERME, L.R.G.; THANNHAUSER, T.W.; LI, L. Impact of selenium supply on Se-methylselenocysteine and glucosinolate accumulation in selenium biofortified Brassica sprouts. **Food Chemistry**, Amsterdam, v. 165, p. 578-586, 2014.
- BÓNA, L.; ADÁNYI, N.; FARKAS, R.; SZANICS, E.; SZABÓ, E.; HAJÓS, G.Y.; PÉCSVÁRADI, A.; ÁCS, E. Variation in crop nutrient accumulation: selenium content of wheat and triticale grains. **Acta Alimentaria**, Budapest, v. 38, n. 1, p. 9-15, 2009.
- BORRILL, P.; CONNORTON J. M.; BALK, J. Biofortification of wheat grain with iron and zinc: integrating novel genomic resources and knowledge from model crops. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v. 5, p. 1-8, 2014.
- BROADLEY, M.R.; WHITE, P. J.; BRYSON, R. J.; MEACHAM, M. C.; BOWEN, H.C.; JOHNSON, S.E.; HAWKESFORD, M.J.; MCGRATH, S.P.; ZHAO, F.J.; BREWARD, N.; HARRIMAN, M.; TUCKER, M. Biofortification of UK food crops with selenium. **Proceedings of the Nutrition Society**. Palmerston North, v. 65, n. 2, p. 169–181, 2006. Doi: 10.1079/PNS2006490.
- BROWN, T. A.; SHRIFT, A. Selenium: toxicity and tolerance in higher plants. **Biological Reviews**, Chichester, v. 57, n. 1, p. 59–84, 1982. doi: 10.1111/j.1469-185X.1982.tb00364.x.
- BUCHNER, P.; STUIVER, C. E. E.; WESTERMANN, S. Regulation of sulfate uptake and expression of sulfate transporter genes in Brassica oleracea L. as affected by atmospheric H₂S and pedospheric sulphate nutrition. **Plant Physiology**, Rockville, v. 136, p. 3396–3408, 2004.
- CABANNES, E.; BUCHNER, P.; BROADLEY, M.R.; HAWKESFORD, M. J. A comparison of sulfate and selenium accumulation in relation to the expression of sulfate transporter genes in Astragalus species. **Plant Physiology**, Rockville, v. 157, n. 4, p. 2227–2239, 2011. Doi: 10.1104/pp.111.183897.
- CAPPA, J. J.; PILON-SMITS E. A. H. Evolutionary aspects of elemental hyperaccumulation. **Planta**, Heidelberg, v. 239, p. 267–275, 2014.
- CARVALHO, G.S. **Selênio e mercúrio em solos sob cerrado nativo**. 2011. 93 f. Tese (Doutorado em Ciências do Solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011.

- COMBS JUNIOR, G.F. Selenium in global food systems. **The British Journal of Nutrition**, Cambridge, v. 85, n. 5, p. 517-547, 2001.
- CHILIMBA, A. D. C.; YOUNG, S. D.; BLACK, C. R.; MEACHAM, M. C.; LAMMEL, J.; BROADLEY M. R. Agronomic biofortification of maize with selenium (Se) in Malawi. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 125, p. 118-128, 2012.
- 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. **Proceeding**. Washington: USDA, 2005. p.20-25.
- EL MEHDAWI, A. F.; PILON-SMITS, E. A. H. Ecological aspects of plant selenium hyperaccumulation. **Plant Biology**, Chichester, v. 14, n. 1, p. 1–10, 2012. Doi: 10.1111/j.1438-8677.2011.00535.x.
- EL MEHDAWI, A. F.; PASCHKE, M. W.; PILON-SMITS E. A. H. *Symphytotrichum coides* populations from seleniferous and non seleniferous soil display sing variation in selenium accumulation. **New Phytologist**, Chichester, v. 206, p. 231–242, 2015.
- FARIA, L.A. **Levantamento sobre selênio em solos e plantas do Estado de São Paulo e sua aplicação em plantas forrageiras**. 2009. 75 f. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) - Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2009.
- FARNHAM, M.W.; HALE, A.J.; GRUSAK, M.A.; FINLEY, J.W. Genotypic and environmental effects on selenium concentration of broccoli heads grown without supplemental selenium fertilizer. **Plant Breeding**, Berlin, v. 26, n. 2, p. 195-200, 2007.
- FEIST, L. J.; PARKER, D.R.. Ecotypic variation in selenium accumulation among populations of *Stanleya pinnata*. **New Phytologist**, Chichester, v. 149, p. 61–69, 2001.
- FENG, R.; WEI, C.; TUD, S. The roles of selenium in protecting plants against abiotic stresses. **Environmental and Experimental Botany**, Amsterdam, v. 87, p. 58–68, 2013. Doi: 10.1016/j.envexpbot.2012.09.002.
- FICHTNER, S. S.; PAULA, A. N.; JARDIN, E. C.; SILVA, E. C.; LOPES, H. O. S. Estudo da composição mineral de solos, forragens e tecido animal de bovinos do município de Rio Verde, Goiás: cobre, molibdênio, selênio. **Anais das Escolas de Agronomia e Veterinária**, Goiânia, v. 20, n. 1, p. 1-6, 1990.
- FOOD OUTLOOK: BIENNIAL REPORT ON GLOBAL FOOD MARKETS. Roma: Food and Agriculture Organization – FAO, 2016. Disponível em: <<http://www.fao.org/giews>>. Acesso em: 30 jan. 2015.
- FORDYCE, F. M. Selenium deficiency and toxicity in the environment. In: SELINUS, O. et al. (Ed.). **Essentials of medical geology**. Dordrecht: Springer, 2013. p. 375–416.
- 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**, Chichester, v. 86, n.13, p. 2213-2220, 2006.

GERLAND, P.; RAFTERY, A.E.; SVCIKOVA, H.; LI, N.; GU, D.; SPOORENBERG, T.; ALKEMA, L.; FOSDICK, B.K.; CHUNN, J.; LALIC, N.; BAY, G.; BUETTNER, T.; HEILIG, G.K.; WILMOTH, J. World population stabilization unlikely this century. **Science**, Washington, v. 346, n. 6206, p. 234-237, 2014.

GIGOLASHVILI, T.; KOPRIVA, S. Transporters in plant sulphur metabolism. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v. 5, p. 422, 2014. Doi: 10.3389/fpls.2014.00442.

GISSEL-NIELSEN, G.; GUPTA, U.C.; LAMAND, M.; WESTERMARCK, T. Selenium in soils and plants and its importance in livestock and human nutrition. **Advances in Agronomy**, Maryland Heights, v. 37, p. 397-460, 1984.

GOLUBKINA, N.A.; YURIEV, A.N.; GINS, V.K.; KONONKOV, P.F.; HOOTSOPARIA, T.I.; SOKOLOVA, A.J.; PIVOVAROV, V.P.; PYSHNAYA, O.N. The accumulation of selenium in different accessions of sweet pepper. **Capsicum and Enggplant Newsletter**, Grugliasco, v. 19, p. 23-26, 2000.

GRAHAM, R.D.; WELCH, R.M.; SAUNDERS, D.A.; ORTIZ-MONASTERIO, I.; BOUIS, H.E.; BONIERBALE, M.; HAAN, S.; BURGOS, G.; THIELE, G.; LIRIA, R.; MEISNER, C.A.; BEEBE, S.E.; POTTS, M.J.; KADIAN, M.; HOBBS, P.R.; GUPTA, R.K.; TWOMLOW, S. Nutritious subsistence food systems. **Advances in Agronomy**, Maryland Heights, v. 92, p. 1-74, 2007.

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

HARVESTPLUS. **Desenvolvendo produtos agrícolas mais nutritivos**. Washington: HarvestPlus, 2004. 4p.

HAUG, A.; GRAHAM, R.D.; CHRISTOPHERSEN, O.A.; LYONS, G.H. How to use the world's scarce selenium resources efficiently to increase the selenium concentration in food. **Microbial Ecology in Health and Disease**, Jaerfaella, v. 19, n. 4, p. 209-228, 2007.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. Diretoria de Pesquisas, Coordenação de Trabalho e Rendimento, Pesquisa de Orçamentos Familiares. **Energia, macronutrientes e fibra na composição de alimentos por 100 gramas de parte comestível**: período 2008-2009. Rio de Janeiro, 2011a.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. Diretoria de Pesquisas, Coordenação de Trabalho e Rendimento, Pesquisa de Orçamentos Familiares. **Prevalência de consumo alimentar segundo os alimentos**: Brasil: período 2008-2009. Rio de Janeiro, 2011b.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Estimativas da população brasileira em 2015. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/apps/populacao/projecao/>>. Acesso em: 28 jan. 2015.

- JOY, E. J. M.; BROADLEY, M. R.; YOUNG, S. D.; BLACK, C. R.; CHILIMBA, A. D.; ANDER, E. L.; BARLOW, T. S.; WATTS, M. J. Soil type influences crop mineral composition in Malawi. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 505, p. 587–595, 2015. Doi:10.1016/j.scitotenv.2014.10.038.
- KATAOKA, T.; HAYASHI, N.; YAMAYA, T.; TAKAHASHI, H. Root-to-shoot transport of sulfate in Arabidopsis. Evidence for the role of SULTR3;5 as a component of low-affinity sulfate transport system in the root vasculature. **Plant Physiology**, Rockville, v. 136, n. 4, p. 4198–4204, 2004. Doi: 10.1104/pp.104.045625.
- KOPSELL, D.A.; KOPSELL, D.E. Selenium. In: BARKER, A.V.; PILBEAM, D.J. (Ed.). **Handbook of plant nutrition**. Boca Raton: CRC Press, 2006. p. 515-549.
- LI, H-F.; MCGRATH, S. P.; ZHAO, F-J. Selenium uptake, translocation and speciation in wheat supplied with selenate or selenite. **New Phytologist**, Chichester, v. 178, n. 1, p. 92–102, 2008. Doi: 10.1111/j.1469-8137.2007.02343.x.
- LONGCHAMP, M.; ANGELI, N.; CASTREC-ROUELLE, M. Selenium uptake in Zea mays supplied with selenate or selenite under hydroponic conditions. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 362, n. 1, p. 107–117, 2012. Doi: 10.1007/s11104-012-1259-7.
- LEAL, V.S.; LIRA, P.I.C.; MENEZES, R.C.E.; OLIVEIRA, J.S.; COSTA, E.C.; ANDRADE, S.L.L.S. Desnutrição e excesso de peso em crianças e adolescentes: uma revisão de estudos brasileiros. **Revista Paulista de Pediatria**, São Paulo, v. 30, n. 3, p. 415-422, 2012.
- LYONS, G.; STANGOULIS, J.; GRAHAM, R. High-selenium wheat: biofortification for better health. **Nutrition Research Reviews**, v. 16, n. 1, p. 45-60, 2003.
- LYONS, G.; ORTIZ-MONASTERIO, I.; STANGOULIS, J.; GRAHAM, R. Selenium concentration in wheat grain: Is there sufficient genotypic variation to use in breeding. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 269, n. 1-2, p. 369-380, 2005.
- McQUINN, S.D.; SLEPER, D.A.; MAYLAND, H.F.; KRAUSE, G.F. Genetic variation for selenium content in tall fescue. **Crop Science**, Madison, v. 31, n. 3, p. 617-620, 1991.
- MIKKELSEN, R. L.; PAGE, A. L.; HAGHIA, G.H. Effect of salinity and its composition on the accumulation of selenium by alfalfa. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 107, n. 1, p. 63–67, 1988.
- MILLER, D. D.; WELCH, R. M. **Food system strategies for preventing micronutrient malnutrition**. New York: Cornell University, 2013.
- MORAES, M.F. **Micronutrientes e metais pesados tóxicos: do fertilizante ao produto agrícola**. São Paulo: Universidade de São Paulo, Centro de Energia Nuclear na Agricultura, 2009. 108p.
- MURPHY, K.M.; REEVES, P.G.; JONES, S.S. Relationship between yield and mineral nutrient concentrations in historical and modern spring wheat cultivars. **Euphytica**, Dordrecht, v. 163, n. 3, p. 381-390, 2008.

NAWAZ, F.; ASHRAF, M. Y.; AHMAD, R.; WARAICH, E. A.; SHABBIR, R. N.; BUKHARI, M. A. Supplemental selenium improves wheat grain yield and quality through alterations in biochemical processes under normal and water deficit conditions. **Food Chemistry**, Amsterdam, v. 175, p. 350-357, 2015.

PAIVA NETO, J. E.; GARGANTINI, H. Dosagem de selênio no solo. **Bragantia**, Campinas, v. 15, n. 1, p. 13-16, 1956.

PILBEAM, D. J.; GREATHEAD, H. M. R.; DRIHEM, K. Selenium. In: BARKER, A. V.; PILBEAM, D. J. (Ed.). **A handbook of plant nutrition**. 2nd. ed. Boca Raton: CRC Press, 2015. p. 165–198.

PILON-SMITS, E. A. H.; QUINN, C. F.; TAPKEN, W.; MALAGOLI, M.; SCHIAVON, M. Physiological functions of beneficial elements. **Current Opinion in Plant Biology**. Kidlington, v. 12, n. 3, p. 267–274, 2009. Doi: 10.1016/j.pbi.2009.04.009.

POMMERENIG, B.; DIEHN, T. A.; BIENERT, G. P. Metalloido-porins: essentiality of nodulin 26-like intrinsic proteins in metalloid transport. **Plant Science**, Shannon, v. 238, p. 212–227, 2015. Doi: 10.1016/j.plantsci.2015.06.002.

QUINN, C. F.; GALEAS, M. L.; FREEMAN, J. L.; PILON-SMITS, E. A. H.. Selenium: deterrence, toxicity, and adaptation. **Integrated Environmental Assessment and Management**, Hoboken, v. 3, n. 3, p. 460–462, 2007. Doi: 10.1897/IEAM_2007-006.

RAMOS, S.J.; RUTZKE, M.A.; HAYES, R.J.; FAQUIN, V.; GUILHERME L.R.; LI, L. (2011): Selenium accumulation in lettuce germplasm. **Planta**, Heidelberg, v. 233, n. 4, p. 649-660, 2011.

RAY, D.K.; MUELLER, N.D.; WEST, P.C.; FOLEY, J.A. Yield trends are insufficient to double global crop production by 2050. **PLoS One**, San Francisco, v. 8, n. 6, p. 1-8, 2013.

RAYMAN, M. P.; BLUNDELL-POUND G.; PASTOR-BARRIUSO R.; GUALLAR, E.; STEINBRENNER, H.; STRANGES, S. A randomized trial of selenium supplementation and risk of type-2 diabetes, as assessed by plasma adiponectin. **PLoS One**, v.7, n. 9, p. 45269, 2012. Doi: 10.1371/journal.pone.0045269.

REIS, A.R.; MORAES, M.; RAMOS, S. J.; GUILHERME, L.R.G. Agronomic biofortification of upland rice with selenium to improve human health. **Journal of Trace Elements in Medicine and Biology**, Muenchen, v. 27S1, p. 42-42, 2013.

REIS, A.R.; FURLANI JUNIOR, E.; MORAES, M.F.; MELO, S.P. Biofortificação agrônômica com selênio no Brasil como estratégia para aumentar a qualidade dos produtos agrícolas. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, Tupã, v. 8, n. 2, p. 128-138, 2014.

RIOS, J.J.; BLASCO, B.; ROSALES, M.A.; SANCHEZ-RODRIGUES, E.; LEYVA, R.; CERVILLA, L.M.; ROMERO, L.; RUIZ, J.M. Response of nitrogen metabolism in lettuce plants subjected to different doses and forms of selenium. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, Chichester, v. 90, p.1914-1919, 2010.

ROSENFELD, I.; BEATH, O. A. **Selenium**: geobotany, biochemistry, toxicity, and nutrition. New York: Academic Press, 1964.

SCHIAVON, M.; PILON, M.; MALAGOLI, M.; PILON-SMITS, E. A. H. Exploring the importance of sulphate transporters and ATP sulphurylases for selenium hyperaccumulation—comparison of *Stanleya pinnata* and *Brassica juncea* (Brassicaceae). **Frontiers in Plant Science**. Lausanne, v. 6, p. 2, 2015. Doi: 10.3389/fpls.2015.00002.

SEREGINA, I.I.; NILOVSKAYA, N.T.; OSTAPENKO, N.O. The role of selenium in the formation of the grain yield in spring wheat. **Agrokhimiya**, Moscow, v.1, p.44-50, 2001.

TAKAHASHI, H.; WATANABE-TAKAHASHI, A.; SMITH, F. W.; BLAKE-KALFF, M.; HAWKESFORD, M. J.; SAITO, K. The roles of three functional sulfate transporters involved in uptake and translocation of sulphate in *Arabidopsis thaliana*. **Plant Journal**, Chichester, v. 23, n. 2, p. 171–182, 2000. Doi: 10.1046/j.1365-3113x.2000.00768.x.

TEGEDER, M. Transporters for amino acids in plant cells: some functions and many unknowns. **Current Opinion in Plant Biology**. Kidlington, v. 15, n. 3, p. 315–321, 2012. Doi: 10.1016/j.pbi.2012.02.001.

TERRY, N.; ZAYED, A.M.; SOUZA, M.P.; TARUM, A.S. Selenium in higher plants. **Annual Review in Plant Physiology and Molecular Biology**, Palo Alto, v.51, p.401-432, 2000.

VAN HOEWYK, D.; GARIFULLINA, G. F.; ACKLEY A. R. Over expression of AtCpNifS enhances selenium tolerance and accumulation in *Arabidopsis*. **Plant Physiology**, Rockville, v.139, p. 1518–1528, 2005.

WALTER, M.; MARCHEZAN, E.; AVILA, L. A. Arroz: composição e características nutricionais. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.38, n.4, p.1184-1192, 2008.

WELCH, R.M. Micronutrients, agriculture and nutrition: linkages for improved health and well being. In: SINGH, K.; MORI, S.; WELCH, R.M. (Ed). **Perspectives on the Micronutrient Nutrition of Crops**. Jodhpur: Scientific Publishers, 2001. p.247-289.

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

WHITE, P. J.; BOWEN, H. C.; PARMAGURU, P.; FRITZ, M.; SPRACKLEN, W. P.; SPIBY, R. E.; MEACHAM, M. C.; MEAD, A.; HARRIMAN, M.; TRUEMAN, L. J.; SMITH, B. M.; THOMAS, B.; BROADLEY, M. R. Interactions between selenium and sulphur nutrition in *Arabidopsis thaliana*. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 55, n. 404, p. 1927–1937, 2004.

WHITE, P. J. Selenium accumulation by plants (Review). **Annals of Botany**. Oxford, v. 117, p. 213-235, 2016. Doi: 10.1093/aob/mcv180.

WHITE, P. J.; BROWN, P. H. Plant nutrition for sustainable development and global health. **Annals of Botany**. Oxford, v. 105, p. 1073-1080, 2010.

WHITE, P. J.; BROADLEY, M. R.; BOWEN, H. C.; JOHNSON, S. E. Selenium and its relationship with sulfur. In: HAWKESFORD, M. J.; DE KOK, L. J. (Ed). **Sulfur in plants: an ecological perspective**. Dordrecht: Springer, 2007. p. 225–252.

XIMÉNEZ-EMBÚN, P.; ALONSO, I.; MADRID-ALBARRÁAN, Y.; CÁAMARA, C. Establishment of selenium uptake and species distribution in lupine, Indian mustard, and sunflower plants. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**. Washington, v. 52, n. 4, p. 832–838, 2004. Doi: 10.1021/jf034835f.

XUE, T.; HARTIKAINEN, H.; PIIRONEN, V. The antioxidative function of selenium in higher plants: the inhibitive effect of selenium on lipid peroxidation and its enzymatic mechanism. **Chinese Science Bulletin**, Beijing, v. 38, p. 274-277, 1993.

YANLING, Z.; GENXING, P.; JIN, C.; TONGBAI, X.; YALING, D. Effect of genotype on selenium uptake and accumulation by soybean in low:se soils. **Soybean Science**, [S. l.], v. 21, n. 4, p. 263-266, 2002.

ZHANG, L.; SHI, W.; WANG, X.; ZHOU, X. Genotypic differences in selenium accumulation in rice seedlings at early growth stage and analysis of dominant factors influencing selenium content in rice seeds. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 29, n. 9, p. 1601-1618, 2006.

ZHAO, F.J.; SU, Y.H.; DUNHAM, S.J.; RAKSZEGI, M.; BEDO, Z.; McGRATH, S.P.; SHEWRY, P.R. Variation in mineral micronutrient concentrations in grain of wheat lines of diverse origin. **Journal of Cereal Science**, London, v. 49, n. 2, p. 290-295, 2009.

ZIMMERMANN, M.B. Iodine deficiency. **Endocrine Reviews**, Cary, v. 30, n.4, p.376-408, 2009.