UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
CENTRO DE ENERGIA NUCLEAR NA AGRICULTURA

LUIZ TADEU JORDÃO

Absorção, redistribuição e uso de potássio (rubídio) por cultivares de soja com tipo de crescimento indeterminado

Piracicaba
2014

LUIZ TADEU JORDÃO

Absorção, redistribuição e uso de potássio (rubídio) por cultivares de soja com tipo de crescimento indeterminado

Versão revisada de acordo com a Resolução CoPGr 6018 de 2011

Dissertação apresentada ao Centro de Energia Nuclear na Agricultura da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Mestre em Ciências

Área de Concentração: Biologia na Agricultura e no Ambiente

Orientador: Prof. Dr. José Lavres Junior

Piracicaba

2014

AUTORIZO A DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Seção Técnica de Biblioteca - CENA/USP

Jordão, Luiz Tadeu
Absorção, redistribuição e uso de potássio (rubídio) por cultivares de soja com tipo de crescimento indeterminado / Luiz Tadeu Jordão; orientador José Lavres Junior. - - versão revisada de acordo com a Resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2014.
83 f.: il.

Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Ciências. Área de Concentração: Biologia na Agricultura e no Ambiente) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura da Universidade de São Paulo.

1. Fertilidade do solo 2. Fisiologia vegetal 3. Nutrição vegetal 4. Plantas oleaginosas 5. Sistema radicular I. Título

CDU (581.13 + 631.81) : 633.34

Dedico este trabalho especialmente ao meu pai, Luiz Antonio Jordão, que recentemente cumpriu seu papel na Terra e recebeu a graça da vida eterna:

"Luiz Antonio Jordão formou-se em Agronomia na primeira turma do curso de Agronomia da Universidade Estadual de Maringá – UEM, em 1980. Dedicou toda sua carreira de Engenheiro Agrônomo em cooperativas da região de Maringá-PR e foi responsável, por exemplo, pela difusão da tecnologia de Integração Lavoura-Pecuária na região Norte do Paraná no final da década de 1990 e pela implementação de diversos projetos de gestão de cooperativas. Apresentou-me desde cedo os prazeres da nossa profissão por meio das lavouras de tomate, mandioca e algodão na pacata Ivinhema, Mato Grosso do Sul. Meu pai é o meu maior orgulho e aqui se faz uma de suas vontades. Continuarei seguindo seus passos."

À Deus por me proporcionar saúde, proteção e sabedoria para cuidar da minha família e atingir meus objetivos profissionais.

À minha mãe Sonia que, juntamente com meu pai, são meus exemplos de vida e inspiração para seguir em frente.

Aos meus amados avós Dalva, Oscar e Idalina (in memoriam), pelo exemplo de bondade, carinho e contínuo incentivo na minha carreira profissional.

À minha querida Tia Ilda e aos meus primos Junior, Lucio, Claudio, Giovana, Vitor e Alessandro, pelo carinho e inestimável apoio durante principalmente esses últimos meses.

À meu Tio Carlão (in memoriam), pelo exemplo de vida, amor e dedicação com a nossa família.

À minha namorada Andréa, pelo amor, carinho, apoio, cumplicidade e paciência.

OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

À Universidade de São Paulo, Centro de Energia Nuclear na Agricultura, e à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Energia Nuclear na Agricultura pela oportunidade de realização do curso.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP (Ref. Proc. 2012/13686-5) pelo apoio financeiro e institucional prestado para a realização deste trabalho.

Ao Professor Dr. José Lavres Junior, pela orientação e valiosos ensinamentos, paciência, confiança e apoio em todas as etapas deste trabalho.

Aos pesquisadores da Embrapa Soja, Dr. Adilson de Oliveira Junior, Dr. Cesar de Castro e Dr. Fábio Alvares de Oliveira, pelos valiosos ensinamentos desde a minha graduação, além da amizade, conselhos, confiança e inestimável apoio no desenvolvimento das atividades na Embrapa Soja.

Ao Professor e amigo, Dr. Antonio Saraiva Muniz, pela orientação ao longo dos cinco anos da minha graduação na Universidade Estadual de Maringá - UEM, além do constante incentivo e conselhos como, por exemplo: “Jovem, na pesquisa temos que saber lidar com as frustrações”.

Aos Professores do CENA/USP e da ESALQ/USP pelos conhecimentos transmitidos durante o curso.

Aos funcionários e estagiários do Laboratório de Solos da Embrapa Soja, Joviano Kleinert, Mariana Germano, Renan Barzan e Renan Chicarelli, pela atenção, ensinamentos e auxílio nas análises laboratoriais.

Aos funcionários do CENA/USP, em especial à Cleusa Pereira Cabral e Suzi Manesco pelo auxílio nas atividades laboratoriais e pelo suporte acadêmico.

Aos funcionários da Seção de Pós Graduação do CENA/USP, Daiane Vieira e Fábio Oliveira, pela atenção e orientações dos trâmites acadêmicos ao longo do curso.

À Biblioteca do CENA/USP, em especial a Marilia Henyei pela inestimável atenção e revisão das normas técnicas, a Raquel Carvalho e Renata Fini pelo pronto atendimento e orientação no uso dos recursos informacionais da biblioteca.

À minha família, pelo carinho e apoio.

Ao pesquisador e amigo, Dr. Valter Casarin, por me acolher em Piracicaba.

À família Toniolo, em especial a Andréa, Gilberto, Claudia e Mariana, pelo apoio, acolhida e freqüente convívio.

Aos colegas do Laboratório de Nutrição Mineral de Plantas do CENA/USP, Aline Grella, André Luiz de Francisco, Bruno Zanchim, Cristiane Prezotto, Ezio Nalin, Felipe Furlan, Felipe Villanueva, Guilherme Franco, Lucia Firme, Nicolas Casarin, Raphael Garrone, Riviane Donha, Renato Lopes e Thiago Nogueira, pela amizade desenvolvida, convívio diário e auxílio no desenvolvimento dos experimentos.

Aos colegas do CENA/USP e da ESALQ/USP, Alfredo Albrecht, Bruno Lago, Clovis Junior, Diego Eberhardt, Eduardo Zavaschi, Evandro Schoninger, Fábio Coutinho, Fernando Guerra, Flávio Rabelo, Gustavo Portz, Hugo Villalba, Ioná Rech, João Paulo, Lucas Miachon, Luís Soares, Marcos Altomani, Marcos Rodrigues, Murilo Campos, Neri Marcante, Paulo Berni, Paulo Lazzarini, Priscila Martins, Ricardo Gava, Simone Si e Thiago Anchieta, pela amizade construída, momentos de alegria e convivência.

Aos grandes amigos Alexandre Hungaro, André Ribas, Augusto Siqueira, Caio Gomes, Carlos Vinícius, Dalton Dorighello, Daniel Malgarin, Danilo Chaves, Guilherme Telles, Igor Alves, Michel Fuzzo, Neto Batista, Pedro Versari, Sergio Tintori, Tiago Versuti, Thiago Brum e Vander Brumatti, pelos inúmeros momentos de alegria e inestimável apoio à minha carreira profissional, e em especial, ao amigo Fábio Lima (mais conhecido como “Fabão do CEPEA”), pelos momentos de descontração, apoio e convívio freqüente em Piracicaba.

A todas aquelas pessoas que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

MUITO OBRIGADO

“Depois de escalar uma grande montanha se descobre que existem muitas outras montanhas para escalar”.

“Não há nada como regressar a um lugar que está igual para descobrir o quanto a gente mudou”.

Nelson Mandela

RESUMO

JORDÃO, L. T. **Absorção, redistribuição e uso de potássio (rubídio) por cultivares de soja com tipo de crescimento indeterminado**. 2014. 83 f. Dissertação (Mestrado) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2014.

Estudos referentes à eficiência de absorção e utilização de potássio (K), bem como a definição de valores críticos de K no solo e na planta para cultivares de soja com tipo de crescimento determinado (TCD) e indeterminado (TCI) são fundamentais para a seleção de genótipos quanto às exigências nutricionais, possibilitando o posicionamento desses materiais para o cultivo em distintos ambientes edáficos. Este trabalho teve como objetivo avaliar a eficiência de absorção de K (rubídio – Rb) por meio dos parâmetros cinéticos de absorção ($V_{máx}$, K_m e $C_{mín}$) e da morfologia radicular; a eficiência de utilização de K por meio do transporte e redistribuição de K (e de Rb) nas partes das plantas; e definir valores críticos de K no solo e nas folhas utilizadas para diagnose em soja com TCI. Os dois primeiros experimentos (cinética de absorção de Rb e morfologia radicular, e transporte e redistribuição de K/Rb) foram desenvolvidos em condições de casa de vegetação no CENA/USP, no período de outubro de 2012 a janeiro de 2013, e o terceiro experimento, foi desenvolvido em condições de campo na Embrapa Soja, no período de setembro de 2010 a março de 2013. Para os dois primeiros experimentos, foi utilizado um cultivar de soja com TCD (TMG 1066 RR) e outros três com TCI (VMAX RR, NA 5909 RG e BRS 360 RR) e para o último experimento, utilizou-se os cultivares de soja com TCI VMAX RR e BRS 360 RR. Houve variação genotípica quanto aos parâmetros morfológicos de raízes, exceto para o diâmetro radicular. Os parâmetros cinéticos de absorção $V_{máx}$, K_m e $C_{mín}$ variaram em função dos cultivares utilizados em cada concentração de Rb. Contudo, não foram verificadas diferenças quanto a eficiência de absorção de K entre cultivares do grupo TCD e TCI. Houve interação significativa entre genótipos e tratamentos de Rb para as variáveis produção de grãos, putrescina, acúmulo de K e Rb, redistribuição de Rb, transporte a longa distância e eficiência de utilização de K. Os cultivares TMG 1066 RR e VMAX RR possuem maior eficiência em produção e utilização de K. Não foram verificadas diferenças quanto ao acúmulo e redistribuição de K para cultivares TCD e TCI. No último experimento, foram verificados sintomas de deficiência de K nos dois cultivares de soja a partir do início da formação de vagens e enchimento de grãos. O NC externo de K para o cultivar VMAX RR e BRS 360 RR foi de, respectivamente, 0,38 e 0,29 $cmol_c\ dm^{-3}$, enquanto que o NC interno de K para os mesmos cultivares foi de 25,4 e 21,3 $g\ kg^{-1}$, respectivamente. Os valores de NC externo e interno obtidos neste estudo são superiores aos verificados na literatura para genótipos de soja com tipo de crescimento determinado (TCD).

Palavras-chave: Eficiência de absorção. Eficiência de utilização. Nível crítico.

ABSTRACT

JORDÃO, L. T. **Uptake, redistribution and potassium (rubidium) use efficiency by soybean cultivars with indeterminate growth type.** 2014. 83 f. Dissertação (Mestrado) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2014.

Studies on the potassium use efficiency (KUE), potassium uptake efficiency (KUpE) as well as the definition of critical values of K in soil and plant for soybean cultivars with determinate growth type (DGT) and indeterminate (IGT) are fundamental to the selection of genotypes to nutritional requirements and allow placement of these materials for cultivation in different edaphic environments. This study aimed to evaluate the K (and Rubidium - Rb) uptake efficiency by uptake kinetics (V_{max}, K_m and $C_{mín}$) assessment and root morphology, the K use efficiency (KUE) through the transport and redistribution of K (and Rb) in plant parts, and define critical values of K in the soil and leaves used for diagnosis for soybeans with IGT. The first two experiments (uptake kinetics of Rb and root morphology, transport and redistribution of K/Rb) were carried out in greenhouse conditions at CENA/USP, from October 2012 to January 2013, and the third experiment was developed under field conditions at Embrapa Soybean, from September 2010 to March 2013. For the first two experiments, one cultivar with DGT (TMG 1066 RR) and three with IGT (VMAX RR, NA RG 5909 and BRS 360 RR) was used, and for the last experiment was used the soybean cultivars with IGT VMAX RR and BRS 360 RR. There was genotypic variation in morphologic parameters of the roots, except for the root diameter. The uptake kinetics parameters V_{max}, K_m and $C_{mín}$ ranged among the cultivars on each concentration of Rb. However, no difference was observed on the K uptake efficiency (KUpE) among the cultivars from DGT or IGT group. There was a significant interaction between genotypes and treatments of Rb for the variables grain mass yield, putrescine, K and Rb accumulation, Rb redistribution, long distance transport of K and K use efficiency (KUE). The TMG 1066 RR and VMAX RR cultivars have a greater efficiency in production and use of K. No differences were found concerning the accumulation and redistribution of K for DGT and IGT cultivars. Symptoms of K deficiency were found in two soybean cultivars from the beginning of pod formation and grain filling. The soil critical levels of K to VMAX RR and BRS 360 RR genotypes were 0.38 and 0.29 $cmol_c$ dm^{-3}, respectively, while the plant-tissue critical levels of K for the same cultivars were 25.4 and 21.3 g kg^{-1}, respectively. The soil and plant-tissue critical level values obtained in this study are higher than those in the literature for genotypes with determinate growth type (DGT).

Keywords: Absorption efficiency. Utilization efficiency. Critical level.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 15
REFERÊNCIAS 16
2 Cinética de absorção de rubídio e morfologia radicular de cultivares de soja com tipo de crescimento indeterminado.....17
2.1 Introdução.....19
2.2 Material e Métodos.....23
2.3 Resultados e Discussão.....26
2.4 Conclusão 36
Referências 36
3 Transporte e redistribuição de potássio por cultivares de soja com tipo de crescimento indeterminado 43
3.1 Introdução.....45
3.2 Material e Métodos.....48
3.3 Resultados e Discussão.....50
3.4 Conclusão 57
Referências 58
4 Nível crítico de potássio para cultivares de soja com tipo de crescimento indeterminado em Latossolo Vermelho distroférrico 62
4.1 Introdução.....64
4.2 Material e Métodos.....68
4.3 Resultados e Discussão.....72
4.4 Conclusão 77
Referências 78
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....83

1. INTRODUÇÃO

A cultura da soja apresenta expressiva importância sócio-econômica mundial devido a sua utilização como fonte de proteína na alimentação humana e animal, além da possibilidade de ser utilizada como matéria-prima para produção de biocombustíveis. Estima-se que na safra 2013/2014 serão produzidas em todo mundo aproximadamente 287 milhões de toneladas de soja, das quais 80% serão colhidas nos Brasil (31%), Estados Unidos (31%) e Argentina (19%) (USDA, 2014), indicando a partir desta safra, provável liderança brasileira na produção mundial de soja. No Brasil, a produção de soja para esta safra é estimada em 90,3 milhões de toneladas, distribuída principalmente entre os estados de Mato Grosso, Paraná, Rio Grande do Sul, Goiás, Mato Grosso do Sul e Bahia (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB, 2014). Projeções indicam que para a safra 2022/2023, serão produzidos 120 milhões de toneladas de soja, o que representa um incremento de 47% em relação ao volume produzido na última safra (FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE SÃO PAULO – FIESP, 2013), evidenciando a importância em pesquisa e desenvolvimento neste setor.

Atualmente, a maior parte dos genótipos de soja cultivados no Brasil apresentam tipo de crescimento indeterminado (TCI), característica esta que se traduz em uma série de vantagens agronômicas, como: antecipação da época de semeadura e precocidade, permitindo o plantio de safrinha; ampla faixa de adaptação e amplitude da época de semeadura numa mesma região, características estas que são mais restritivas aos genótipos com tipo de crescimento determinado (TCD) (OLIVEIRA JUNIOR et al., 2013). Contudo, acredita-se que esta mudança na demanda de mercado por cultivares TCI exija ajustes ou mesmo novos paradigmas de manejo de fertilidade do solo.

Quanto a nutrição da soja, o potássio (K) deve ser discutido com maior atenção, pois ocupa o segundo lugar em termos de exigência e exportação pela cultura, quantidades estas que só são inferiores às verificadas para o nitrogênio (N) (BORKERT et al., 1994). Além disso, observações a campo nas últimas safras indicam o surgimento de desordens nutricionais de K em soja TCI (OLIVEIRA JUNIOR et al., 2013).

Portanto, verificar a eficiência de absorção e utilização de K entre cultivares de soja TCD e TCI, sob condições contrastantes de suprimento de K, permite selecionar genótipos quanto a exigência nutricional por este nutriente e posicioná-los para o cultivo em distintos ambientes edáficos.

Os objetivos do presente estudo foram avaliar: a eficiência de absorção de K (rubídio – Rb) por meio da morfologia radicular e dos parâmetros cinéticos de absorção ($V_{máx}$, K_m e $C_{mín}$); a eficiência de utilização de K por meio do transporte e redistribuição de K (e de Rb) nas partes das plantas (raízes, caules e pecíolos, limbos, pericarpos e grãos); e definir valores críticos de K no solo e nas folhas utilizadas para diagnose em soja com TCI.

REFERÊNCIAS

BORKERT, C. M.; YORINORI, J. T.; CORRÊA-FERREIRA, B. S.; ALMEIDA, A. M. R.; FERREIRA, L. P.; SFREDO, G J. Seja doutor da sua soja. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, n. 66, 16 p. jun. 1994. (Arquivo do Agrônomo, 5).

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**. v. 1 Safra 2013/14, n. 4 Quarto levantamento. Brasília, DF, 2014. 67 p.

FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE SÃO PAULO – FIESP. **Outlook FIESP 2023**: projeções para o agronegócio brasileiro. São Paulo, 2013. 115 p.

OLIVEIRA JUNIOR, A de; CASTRO, C. de; OLIVEIRA, F. A. de; JORDÃO, L. T. Adubação potássica da soja: cuidados no balanço de nutrientes. **Informações Agronômicas, IPNI**, Piracicaba, n. 143, p. 1-10, 2013.

USDA. **Production, Supply and Distribution Online**. Washington, DC, 2014. Disponível em: http://apps.fas.usda.gov/psdonline/. Acesso em: 25 jan. 2014.

2. Cinética de absorção de rubídio e morfologia radicular de cultivares de soja com tipo de crescimento indeterminado

Resumo – Estudos referentes aos parâmetros cinéticos de absorção de potássio (K) e morfologia radicular da soja são importantes para selecionar cultivares quanto a eficiência de absorção de K. Este trabalho teve como objetivo avaliar a eficiência de absorção de K por meio da utilização de cultivares de soja com tipo de crescimento determinado (TCD) e indeterminado (TCI). O estudo foi desenvolvido sob condições de casa de vegetação no Centro de Energia Nuclear na Agricultura, da Universidade de São Paulo, no período de outubro de 2012 a janeiro de 2013. Para o estudo morfológico de raízes, foi utilizado um cultivar de soja com TCD (TMG 1066 RR) e outros três com TCI (VMAX RR, NA 5909 RG e BRS 360 RR), sob condições de baixo suprimento de K (1 mmol L^{-1}), e com cinco épocas de coleta de raízes (3, 6, 9, 12 e 15 dias) após estádio V4, com três repetições. No estudo dos parâmetros cinéticos de absorção de K, utilizou-se rubídio (Rb) como traçador de K na planta, e os mesmos cultivares da primeira etapa experimental, submetidos a duas concentrações de RbCl (0,2 e 2,5 mmol L^{-1}), com quatro repetições. O delineamento experimental em ambas as etapas experimentais foi de blocos ao acaso. A morfologia radicular foi avaliada por meio de imagens digitalizadas, e cálculos posteriores foram efetuados para contabilizar o comprimento, superfície, volume e diâmetro radicular. Os parâmetros cinéticos de absorção foram ajustados por meio do *software* Cinética® v.1 e *Sigma Plot*® v.10. Houve variação genotípica quanto aos parâmetros morfológicos de raízes, exceto para o diâmetro radicular. Da mesma forma, os parâmetros cinéticos de absorção $V_{máx}$, K_m e $C_{mín}$ variaram em função dos cultivares utilizados em cada concentração de Rb. Contudo, a partir dos dados obtidos, não foi verificado diferenças quanto a eficiência de absorção de K entre cultivares do grupo TCD e TCI.

Palavras-chave: Eficiência de absorção. Parâmetros cinéticos. Crescimento radicular.

Kinetics of rubidium uptake and root morphology of soybean cultivars with indeterminate growth type

Abstract – Studies on the uptake kinetics of potassium (K) and root morphology of soybean are important to select the best cultivars in efficiency absorption of K. This study aimed to evaluate the efficiency of absorption of K by the use of soybean cultivars with determinate growth type (DGT) and indeterminate (IGT). The study was conducted under greenhouse conditions at the Center for Nuclear Energy in Agriculture, University of São Paulo, from October 2012 to January 2013. For the morphological study of roots, one cultivar with DGT (TMG 1066 RR) and three others with IGT (VMAX RR, NA 5909 RG and BRS 360 RR) was used under conditions of low K supply (1 mmol L^{-1}), five times of collecting roots (3, 6, 9, 12 and 15 days) after V4 stage, with three replications. In the study of the K (Rb) kinetic parameters, rubidium (Rb) was used as a tracer for K in the plant, and the same experimental cultivars of the first step, under two concentrations of RbCl (0.2 to 2.5 mmol L^{-1}), with four replications. The experimental design in both experimental setup was randomized blocks. The root morphology was evaluated by digitizing images, and subsequent calculations were made to account the total root length, total root area, volume and root diameter. The uptake kinetics were adjusted using the Cinética® v.1 and Sigma Plot® v.10 software. There was genotypic variation in morphologic parameters of the roots, except for the root diameter. Similarly, the uptake kinetics parameters V_{max}, K_m and $C_{mín}$ depended on the cultivars used in each level of Rb. However, from the data obtained, was not observed differences in K uptake efficiency (KUpE) among the cultivars DGT and IGT group.

Keywords: Absorption efficiency. Kinetic parameters. Root growth.

2.1 Introdução

As plantas absorvem potássio (K) da solução do solo em grandes quantidades na forma iônica monovalente K^+ (BARBER, 1968; LEONARD, 1985; HAVLIN et al., 2005; EPSTEIN; BLOOM, 2006), local onde o teor pode variar desde 1 a 50 mg L^{-1}, ou mais, em solos fertilizados (MEURER, 2006) e a disponibilidade e manutenção do equilíbrio desse nutriente nesta solução é coordenada principalmente pelas características químicas e mineralógicas dos solos (MEURER, 2006; ERNANI; ALMEIDA; SANTOS, 2007; MELO; CASTILHOS; PINTO, 2009). No citosol, comumente a concentração de K^+ é de aproximadamente 120 mmol L^{-1} (EPSTEIN; BLOOM, 2006).

O K e outros elementos essenciais ao desenvolvimento dos vegetais como o fósforo (P), o manganês (Mn) e o zinco (Zn) entram em contato com as raízes das plantas, em grande parte, pelo processo de difusão, o qual consiste no movimento espontâneo do nutriente de uma região de maior concentração - solução do solo - para outra região de menor concentração - zona radicular - (BARBER, 1984; MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997). No caso específico do K, a quantidade fornecida pela difusão representa 70% a 90% de todo o elemento absorvido pela planta (BARBER, 1966; COSTA et al., 1988; RUIZ; MIRANDO; CONCEIÇÃO, 1999; MALAVOLTA, 2006). Rosolem et al. (2003), estudando os mecanismos de suprimento de K por raízes de milheto, concluíram que a difusão foi responsável por mais de 88% e 95% do suprimento de K às raízes, respectivamente para baixa e alta disponibilidade do nutriente no solo. Contudo, o transporte de K também pode ocorrer, a longas distâncias e em menor grau, por meio do fluxo de massa, uma vez que os íons K^+ estão dissolvidos na solução do solo e são carreados com a água até a rizosfera (BARBER, 1985). Ruiz, Miranda e Conceição (1999) concluíram que a interceptação radicular não pode ser considerada como um meio de transporte do K em solução para à superfície das raízes, pois na ausência de água, as trocas entre as partículas do solo e as raízes torna-se impossibilitada.

Após o contato íon-raiz, o K^+ é absorvido com o auxílio de transportadores através de canais específicos localizados na membrana plasmática das células da epiderme radicular (MAATHUIS; SANDERS, 1997). Hille (1996), afirma que os canais de K^+ presentes na membrana plasmática são simples e caracterizados por uma curta seção na região dos poros, a qual coordena a seletividade a este nutriente. Há relatos da ocorrência de canais na membrana direcionados para a parte interior e exterior das células, nos quais o íon K^+ segue o potencial

elétrico da membrana plasmática (POTTOSIN; ANDJUS, 1994), podendo ainda ocorre a extrusão de íons de hidrogênio (H^+) para fora da célula (LÖPPERT, 1983), especialmente em células do sistema radicular (LEONARD, 1985), com intuito de manter o potencial elétrico celular.

Basicamente, existem dois sistemas de transporte de K^+ (LEONARD, 1985; MALAVOLTA, 2005; ROSOLEM, 2005; MEURER, 2006; EPSTEIN; BLOOM, 2006). O primeiro, denominado mecanismo 1 ou HATs (*high-affinity transport system*), atua a baixas concentrações de K na solução externa, ou seja, possui alta afinidade e seletividade no transporte de K^+. Para este sistema, a absorção de K^+ ocorre via simporte K^+/H^+ (RUBIO; GASSMAN; SCHROEDER, 1995) e ambos os íons são transportados juntos por meio da membrana plasmática até o citosol (ROSOLEM, 2005). A proteína facilitadora do transporte de alta afinidade (HKT1) é provavelmente um co-transportador K^+/H^+ e apresenta uma ordem de seletividade de $K^+ > Cs^+ > Rb^+ > Na^+ > NH_4^+$ (SCHACHTMAN; SCHROEDER, 1994). Já o segundo sistema, conhecido como mecanismo 2 ou LATs (*low-affinity transport system*), opera sob altas concentrações de K^+ na solução externa e possui baixa afinidade no transporte de K^+, podendo ainda estar sujeito a interferências de outros íons (ROSOLEM, 2005). Este último sistema transporta K^+ por difusão facilitada pelos canais seletivos até o citosol (FOX; GUERINOT, 1998).

Siddiqi e Glass (1982) e Glass (1983) citam que a taxa de absorção de K^+ pelas raízes é coordenada pelo conteúdo de K^+ nos tecidos, ou seja, o aumento do conteúdo de K^+ nos tecidos favorece a redução da absorção desse elemento pelas raízes. Leonard (1985) descreve que quando a concentração de K^+ na solução externa é aumentada, a taxa de absorção de K^+ é elevada proporcionalmente, porém em altas concentrações de K^+, os sítios de absorção desse nutriente tornam-se totalmente preenchidos, saturando a taxa de absorção de K^+. A absorção de K^+ também pode ser relacionada ao conteúdo de adenosina 5´-trifosfato, ATP (PETRAGLIA; POOLE, 1980), pois reduções na absorção desse nutriente pelas raízes pode ser justificada pelo decréscimo da síntese de ATP nas células radiculares (LEONARD, 1985).

Adicionalmente, em estudos clássicos de fisiologia e nutrição de plantas utiliza-se comumente rubídio (Rb) como traçador de K nas plantas. Esses cátions K^+ e Rb^+ possuem raio atômico semelhante e ambos ocupam os mesmos sítios de ligação da membrana plasmática de células radiculares (ERDEI; TRIVEDI, 1991), possibilitando a utilização do Rb^+ como marcador de K^+ (WIEBE; KRAMER 1954; CALVACHE; PINO; BUNEDER, 1990; MORITSUGU; SHIBASAKA; KAWASAKI, 1993). Embora o Rb^+ não possa

substituir totalmente o K^+ nas funções metabólicas (MARSCHNER, 1995), tem capacidade de substituí-lo na transferência de prótons em nível de tonoplasto (NAKAOJI, 1991 et al.; MARSCHNER, 1995).

Barber (1984), Duncan e Baligar (1990) e Marschner (1995) descrevem que a aquisição de um dado nutriente do solo está condicionada a eficiência dos mecanismos de absorção por meio de parâmetros cinéticos ($V_{máx}$, K_m e $C_{mín}$) e dos aspectos morfológicos do sistema radicular (SCHENK; BARBER, 1979; CLARKSON, 1985; ALVES et al., 2002).

Os efeitos do suprimento de K no desenvolvimento radicular são amplamente relatados na literatura (FAGERIA; MOREIRA, 2011). Sanes et al. (2013) concluíram que há modificações no comprimento, raio médio e área radicular, e nos parâmetros cinéticos de absorção de K entre 11 cultivares de arroz. A taxa de difusão de K^+ é diretamente proporcional a superfície radicular (VILELA; ANGHINONI, 1984). Lavres Junior e Monteiro (2003), concluíram que o fornecimento de K e N para plantas de capim-Mombaça contribuiu para o aumento do comprimento e da superfície de raízes.

Outros nutrientes como o P também influenciam a área radicular de cultivares de soja (VILELA; ANGHINONI, 1984), e o comprimento radicular em plantas de milho (MACHADO; FURLANI, 2004). Martins, Crusciol e Pilon (2012) também verificaram aumento no comprimento e superfície radicular de plantas de arroz submetidas a concentrações de silício (Si) aos 40 dias de desenvolvimento da cultura. Ainda, o comprimento radicular da cana de açúcar pode ser influenciado pelo suprimento de Si (MARTINS, 2010).

O fornecimento de micronutrientes também influencia a morfologia radicular. Fageria (2002) descreve que o aumento do suprimento de Zn, boro (B) e cobre (Cu) contribuíram para o desenvolvimento radicular em plantas de arroz, milho, trigo e soja, e que a magnitude desse efeito é variável entre genótipos e nutrientes. Ademais, a presença de substâncias húmicas também influencia a morfologia radicular e os parâmetros cinéticos de absorção de nutrientes de plantas de feijão (ROSA et al., 2009).

A eficiência de absorção de nutrientes pelas raízes também é uma característica herdada geneticamente, na qual espécies e cultivares de plantas diferem quanto à cinética de absorção (MEURER, 2007), que é modulada, em parte, pela morfologia, geometria radicular e quantidades de sítios ativos de absorção (NYE; TINKER, 1977; JUNGK, 1996; REID, 1999).

Além da morfologia radicular, a eficiência de absorção de nutrientes também é influenciada pelos parâmetros cinéticos de absorção como o influxo máximo ($I_{máx}$) ou a velocidade máxima ($V_{máx}$), representada pela taxa máxima de absorção alcançada a altas

concentrações de soluto (EPSTEIN; BLOOM, 2006), a afinidade dos carregadores pelo íon a ser transportado (K_m, constante de Michaelis-Menten) e o $C_{mín}$, representando a concentração externa mínima da solução junto às raízes onde o influxo iguala-se ao efluxo (CLAASSEN; BARBER, 1974).

Comumente, espera-se que uma planta tenha alto $V_{máx}$ e baixo K_m e $C_{mín}$, ou seja, apresente alta eficiência na absorção de um dado nutriente e que ao mesmo tempo, possua carregadores de alta afinidade operando sob baixas concentrações externas do soluto (EPSTEIN; BLOOM, 2006; MEURER, 2006).

Diferenças nos parâmetros cinéticos entre espécies forrageiras foram reportadas por Fattore e Anghinoni (1992). Neste estudo, para o K, as espécies vegetais aveia preta (*Avena strigosa*) e azevém anual (*Lolium multiflorum*) obtiveram maiores valores de $V_{máx}$ e menores valores de K_m, se comparado com trevo subterrâneo (*Trifolium subterraneum*) e ervilhaca (*Vicia* spp.). Lima et al. (2005), estudando a absorção de K em quatro clones de eucalipto, encontraram resultados maiores de $V_{máx}$ e menores de K_m para o clone 129, porém para o Mg, enquanto este mesmo clone apresentou o maior valor de $V_{máx}$, também obteve o maior valor de K_m, inferindo que os transportadores atuantes neste clone possuem baixa afinidade ao Mg. Roshani e Narayanasamy (2010) concluíram que houve decréscimo de 90% e 50%, respectivamente para os parâmetros cinéticos de absorção $V_{máx}$ e K_m de K, com o aumento da idade de plantas de trigo de 22 para 87 dias após a germinação.

Para o Mn na cultura da soja, Lavres Junior (2007) observou maior valor de $V_{máx}$ e menor valor de K_m para o cultivar IAC-Foscarin 31, quando comparado aos cultivares IAC-15 e Santa Rosa. Andrade e Rosolem (2011) não encontraram modificações nos parâmetros cinéticos de absorção de Mn quando aplicado glifosate em cultivar de soja resistente a esta molécula de caráter herbicida.

Silberbush e Barber (1983) realizaram uma análise de sensibilidade, a partir do modelo mecanístico de Cushman, com objetivo de verificar quais parâmetros possuíam maior influência na absorção de K pela soja e os resultados revelaram que a taxa de crescimento radicular absoluto apresentou maior contribuição na absorção, a qual atua diretamente na área de absorção de nutrientes (MEURER, 2006), seguido do raio radicular e da concentração inicial de K no solo, propondo que, com todos os outros parâmetros permanecendo constantes, o suprimento de K pelo solo torna-se mais limitante se comparado aos parâmetros cinéticos de absorção $V_{máx}$, K_m e $C_{mín}$.

Portanto, o estudo da morfologia radicular e dos parâmetros cinéticos de absorção de K na cultura da soja é de suma importância, pois a partir do comportamento de cada cultivar

sob condições contrastantes de suprimento de K, é possível selecionar materiais eficientes quanto a absorção de K ou passíveis de adaptação a diferentes condições edáficas, bem como otimizar o manejo da adubação potássica nesta cultura.

Este trabalho teve como objetivo avaliar a massa da matéria seca de raízes e da parte aérea, e o teor e acúmulo de Rb nesses materiais, bem como a morfologia radicular como, por exemplo, o comprimento, a área superficial, o volume, o diâmetro e a taxa de crescimento radicular absoluto, além dos parâmetros cinéticos de absorção de Rb como $V_{máx}$, K_m e $C_{mín}$ em cultivares de soja com tipo de crescimento determinado (TCD)

2.2 Material e Métodos

O experimento foi desenvolvido em casa de vegetação localizada no Centro de Energia Nuclear na Agricultura, da Universidade de São Paulo, em Piracicaba – SP, no período de outubro de 2012 a janeiro de 2013. Foram utilizados cultivares TCI, NA 5909 RG, VMAX RR e BRS 360 RR.

As sementes foram colocadas para germinar em bandeja rasa com vermiculita, umedecida com solução de sulfato de cálcio ($CaSO_4$, 10^{-4} mol L^{-1}). Quando as plântulas atingiram cerca de 5 cm de altura, foram transferidas para bandeja plástica com capacidade de 40 L contendo solução nutritiva (HOAGLAND; ARNON, 1950), adaptada por Epstein e Bloom (2006), diluída a 1/5 da concentração usual, e com o valor de pH próximo a 5,0 (período de adaptação). Após o terceiro dia do transplante das mudas, duas plantas de cada cultivar, no estádio Vc, foram transferidas para vasos plásticos de 2,5 L contendo 2,0 L de solução nutritiva completa (Figura 1A), exceto para K, o qual teve seu fornecimento limitado a 1 mmol L^{-1} até o estádio fenológico V5 (Figura 1B). As plantas foram fixadas na região do colo com auxílio de espuma plástica, de modo que somente o sistema radicular entrasse em contato com a solução nutritiva.

Durante a realização do experimento, as soluções nutritivas, sob constante aeração, foram renovadas a cada 15 dias, completando-se o volume dos vasos com água deionizada, quando necessário. O valor de pH das soluções ficou em torno de 5,0 e a temperatura média da casa-de-vegetação durante o período experimental foi de 27ºC.

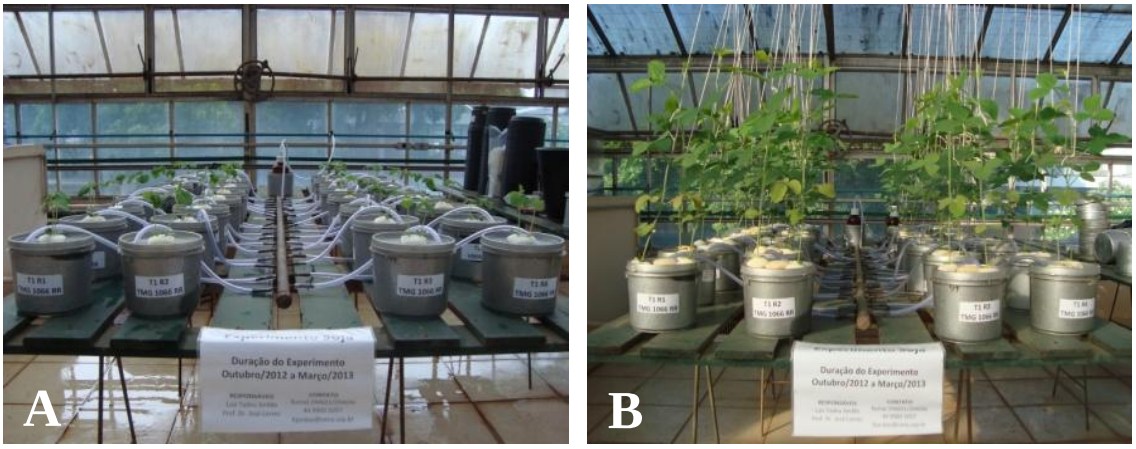

Figura 1 - Visão do experimento. Plântulas de soja no estádio Vc (A) e no estádio V5 (B)

No estudo morfológico de raízes foram utilizadas plantas de soja no estádio fenológico V5. A partir desse estádio, a concentração de K na solução nutritiva permaneceu a 1 mmol L^{-1} e a cada três dias, coletou-se plantas e renovou-se a solução nutritiva com intuito de manter constante a concentração dos íons K^+ na solução. O delineamento experimental foi de blocos ao acaso, com cinco coletas de plantas e três repetições, totalizando 60 unidades experimentais.

Ao final de cada coleta de plantas, as raízes foram lavadas com água deionizada corrente e o material vegetal foi dividido em raízes e parte aérea. Para a quantificação do comprimento, da área superficial, do volume e diâmetro radicular, foi retirada uma sub-amostra de raiz para cada unidade experimental, com cerca de 20% da massa fresca total (BOHM, 1979; HABIB, 1988; BOX JUNIOR, 1996; COSTA et al., 2002; LAVRES JUNIOR; MONTEIRO, 2003; LAVRES JUNIOR et al., 2008). Em seguida, essas sub-amostras foram acondicionadas em potes plásticos contendo água deionizada e 2 mL de cloreto de pararosanilina (violeta de genciana, fórmula molecular $C_{25}H_{30}ClN_3$) para que as partes mais novas e claras fossem tingidas, e armazenadas em geladeira ± 10ºC (NOORDWIJK; FLORIS, 1979) evitando-se, portanto, a desidratação e perda de massa seca por respiração durante a manipulação do material vegetal. Posteriormente, procedeu-se a digitalização das sub-amostras de raízes com auxílio do *software HP PrecisionScan Pro 2.03*® acoplado ao *scanner HP ScanJet 6300C*®, e em seguida, a partir das imagens digitalizadas, analisou-se a morfologia radicular por meio do *software WinRHIZO Reg 3.8b*® (Regent Instruments Inc.). Os valores totais de comprimento, superfície e volume radicular foram obtidos por regra de três direta entre os valores da sub-amostra e sua massa seca com a massa seca total de raízes de cada unidade experimental, representados somente pelas

amostras de raiz do último tempo de coleta (15º dia), e utilizou-se ainda o diâmetro médio da subamostra. A taxa de crescimento radicular absoluto foi calculada a partir do comprimento radicular obtido em cada tempo de coleta, conforme equação proposta por Hunt (1978).

Para o estudo dos parâmetros cinéticos $V_{máx}$, K_m e $C_{mín}$, utilizou-se Rb como análogo de K e plantas de soja no estádio fenológico V5 (Figura 2A). Quando as plantas atingiram este estádio, as soluções nutritivas foram renovadas omitindo-se os íons K^+ durante 24 horas, visando aumentar a capacidade de absorção desse íon *"low salt high carbohydrate"* (EPSTEIN; HAGEN, 1952). Após este curto período, renovaram-se novamente as soluções nutritivas, lavaram-se as raízes com água deionizada corrente e iniciaram-se os tratamentos com Rb nas soluções de exaustão. Foram utilizados duas concentrações de Rb, 0,2 mmol L^{-1} e 2,5 mmol L^{-1}, por meio de cloreto de rubídio (RbCl), distribuídos segundo o delineamento experimental de blocos ao acaso, com quatro repetições, totalizando 32 unidades experimentais.

Figura 2 - Cultivares de soja no estádio V5, antes do início das coletas de solução nutritiva (A) e vaso contendo seringa graduada para coleta das alíquotas e tubete para armazenamento do material coletado (B)

Após 30 minutos de exposição de Rb nas soluções nutritivas de exaustão, iniciou-se a coleta das alíquotas em cada vaso. Foram tomadas alíquotas de 10 mL a cada 15 minutos nas duas primeiras horas; a cada 30 minutos nas quatro horas seguintes; a cada 60 minutos nas seis horas subseqüentes; e por fim, a cada 12 horas até o período experimental final de 84 horas. As alíquotas foram retiradas com auxílio de seringas graduadas de 10 mL e armazenadas em tubetes de 50 mL, devidamente identificados (Figura 2B), em local seco e fresco. O volume das soluções dos vasos foi mantido constante durante todo o período experimental, por meio da adição de água deionizada, quando necessário.

Ao final da coleta das alíquotas, as plantas foram divididas em raízes e parte aérea, acondicionadas em sacos de papel devidamente identificados e colocados para secar em estufa a 65ºC, por período de 96 horas. Posteriormente, aferiu-se a massa seca, calculou-se a relação raiz/parte aérea, e os tecidos vegetais foram processados em moinho tipo Wiley e submetido à digestão por via úmida em forno de micro-ondas (HNO_3 + H_2O_2) à 170ºC durante 40 minutos, segundo metodologia adaptada de AOAC (2000). Em seguida, os extratos foram utilizados para determinar a concentração de Rb nos tecidos, com o auxílio de equipamento de espectrometria de emissão óptica por plasma acoplado indutivamente (*Optima 8300 ICP-OES Spectrometer*).

A concentração de Rb nas alíquotas extraídas da solução de exaustão, em cada tempo de amostragem, foram utilizados para estimar os parâmetros cinéticos $V_{máx}$ e K_m da equação de Michaelis-Menten, por meio de aproximação gráfico-matemática, conforme sugerido por Ruiz (1985), e com auxílio do *software* Cinética® (RUIZ; FERNANDES FILHO, 1992). O $C_{mín}$ foi estimado pela média dos valores da concentração de Rb na solução de exaustão, a partir do ponto em que o influxo iguala-se ao efluxo (CLAASSEN; BARBER, 1974). As curvas de depleção e as isotermas indicando a atuação dos mecanismos de alta e baixa afinidade foram ajustadas por meio do *software Sigma Plot® v.10*. Procedeu-se a análise de variância para os dados de ambas as etapas experimentais e aplicação do teste de Tukey (P<0,05) somente para as médias obtidas na etapa de avaliação radicular, por meio do *software SAS - System for Windows 6.11* (SAS INSTITUTE, 1996).

2.3 Resultados e Discussão

Quanto à morfologia radicular, houve influência genotípica para massa seca radicular ($P<0,01$), comprimento ($P<0,05$), superfície ($P<0,05$) e volume radicular ($P<0,01$), exceto para o diâmetro radicular médio ($P<0,10$), conforme verificado na Tabela 1.

O cultivar VMAX RR apresentou produção de massa seca 43 % e 76 % superior ao verificado, respectivamente, para os cultivares BRS 360 RR e TMG 1066 RR. Adicionalmente, o cultivar TMG 1066 RR obteve superfície radicular 23 %, 24 % e 25 % inferior, respectivamente aos cultivares NA 5909 RG, VMAX RR e BRS 360 RR. Quanto ao volume radicular, o cultivar VMAX RR obteve o maior valor, seguido pelos cultivares NA 5909 RG, BRS 360 RR e TMG 1066 RR, conforme dados apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Massa de matéria seca de raízes (MSRA) e morfologia radicular de cultivares de soja submetidos a 1 mmol L^{-1} de K na solução nutritiva no, estádio V5

Cultivares	MSRA	Comprimento	Superfície	Volume	Diâmetro
	g $vaso^{-1}$	m $vaso^{-1}$	cm^2 $vaso^{-1}$	cm^3 $vaso^{-1}$	mm $vaso^{-1}$
TMG 1066 RR	0,52 b	85,64 ab	1008,10 b	9,45 c	0,38 a
VMAX RR	0,92 a	80,46 b	1326,10 a	23,77 a	0,52 a
NA 5909 RG	0,72 ab	91,96 ab	1292,90 a	18,43 b	0,51 a
BRS 360 RR	0,64 b	97,42 a	1335,70 a	14,58 b	0,44 a
CV (%)*	13,01	5,90	7,59	9,90	14,31
DMS**	0,26	14,83	266,05	4,63	0,19

Médias seguidas por letras distintas diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade
*CV (%) = coeficiente de variação
**DMS = diferença mínima significativa

Embora o presente estudo foi desenvolvido em vasos, o aumento no comprimento radicular da soja pode estar relacionado com a eficiência de absorção de K, conforme relatado por Caradus (1990), e Sacramento e Rosolem (1997). Quanto aos genótipos utilizados neste estudo, para a concentração de 2,5 mmol L^{-1} de Rb, o cultivar BRS 360 RR apresentou maior valor de $V_{máx}$ (1,58 mmol g^{-1} h^{-1}) se comparado ao cultivar VMAX RR (0,79 mmol g^{-1} h^{-1}) (Tabela 5) e também maior comprimento radicular (Tabela 1).

Sacramento e Rosolem (1997) encontraram diferença genotípica para cultivares de soja quanto ao comprimento e superfície radicular aos 20 e 40 dias de desenvolvimento, na média de duas concentrações de K (0,50 e 1,82 mmol L^{-1}), porém, similarmente ao presente estudo, não foram observadas alterações no diâmetro radicular. Estes autores justificam a ausência da influência genotípica na variação do diâmetro radicular a partir do pressuposto de que este parâmetro radicular aumenta proporcionalmente com o encurtamento das raízes, o qual parece ser alterado somente sob condições adversas (ROSOLEM et al., 1993), principalmente por fatores como impedimentos físicos (BENGOUGH; MULLINS, 1991; SARQUIS et al., 1991) e toxidez de alumínio (CANAL; MIELNICZUK, 1983), os quais não foram observados durante o desenvolvimento deste trabalho. Quanto ao comprimento radicular em função das classes de diâmetro, foi observado que aproximadamente 75% do comprimento das raízes encontravam-se com diâmetro de até 0,5 mm (dados não mostrados).

Lavres Junior (2007) associa a maior taxa de crescimento radicular absoluto com menores valores de $C_{mín}$, conforme verificado no presente estudo (Figura 3 e Tabela 5). Os cultivares com TCI VMAX RR e BRS 360 RR, sob condições de baixo suprimento de K na

solução nutritiva, apresentaram maior taxa de crescimento radicular absoluto, ao passo que também obtiveram os menores valores de $C_{mín}$ quando comparado aos demais cultivares.

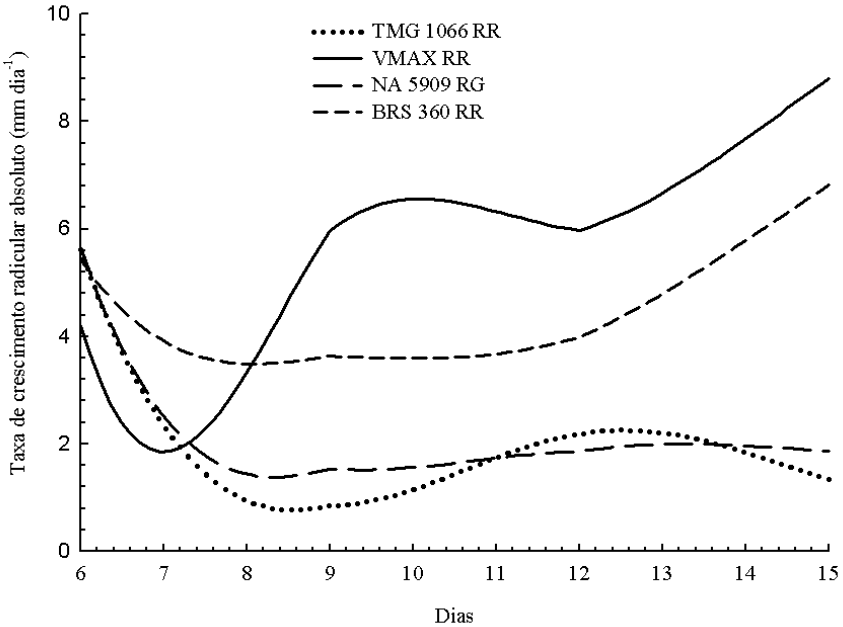

Figura 3 – Taxa de crescimento radicular absoluto (mm dia^{-1}) sob baixa disponibilidade de K na solução nutritiva (1 mmol L^{-1}), em função do tempo de cultivo

Para o estudo dos parâmetros cinéticos de absorção de Rb, não houve diferença significativa entre cultivares para as variáveis de produção de massa de matéria seca de raízes (MSRA) e da parte aérea (MSPA), referente à concentração de 0,2 mmol L^{-1} de Rb, bem como para a relação raiz/parte aérea (RRPA) em cada concentração de Rb estudada. Apesar do Rb não atender os critérios de essencialidade de nutrientes às plantas (MARSCHNER, 1995; DECHEN; NACHTIGALL, 2006; EPSTEIN; BLOOM, 2006; MALAVOLTA, 2006) e ser utilizado em estudos de fisiologia e nutrição de plantas somente com a função de traçar o K nas plantas, para a concentração 2,5 mmol L^{-1} de Rb, houve diferença significativa ($P<0,01$) entre cultivares para as variáveis MSRA e MSPA, em que os cultivares VMAX RR e BRS 360 obtiveram valores superiores, quando comparados aos cultivares TMG 1066 RR e NA 5909 RG, conforme Tabela 2.

Tabela 2 - Massa de matéria seca de raízes (MSRA), parte aérea (MSPA) e relação raiz/parte aérea (RRPA) de cultivares de soja submetidos a duas concentrações de Rb na solução nutritiva, no estádio V5

Rb (mmol L^{-1})	Cultivares	MSRA	MSPA	RRPA
		---------- g $vaso^{-1}$ ----------		
0,2	TMG 1066 RR	0,77 a	6,18 a	0,13 a
	VMAX RR	0,90 a	6,58 a	0,14 a
	NA 5909 RG	0,76 a	6,09 a	0,13 a
	BRS 360 RR	0,97 a	7,14 a	0,14 a
	CV (%)*	13,92	9,01	11,98
	DMS**	0,26	1,29	0,03
2,5	TMG 1066 RR	0,76 b	6,13 b	0,12 a
	VMAX RR	1,32 a	8,43 a	0,16 a
	NA 5909 RG	0,72 b	6,01 b	0,13 a
	BRS 360 RR	1,09 a	8,52 a	0,13 a
	CV (%)*	12,17	7,19	14,72
	DMS**	0,26	1,15	0,04

Médias seguidas por letras distintas diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade
*CV (%) = coeficiente de variação
**DMS = diferença mínima significativa

Quanto ao teor de Rb presente nos tecidos da planta, houve diferença significativa entre cultivares somente para a concentração de 2,5 mmol L^{-1} de Rb nos componentes raízes ($P<0,01$) e parte aérea ($P<0,01$). Para o teor de Rb nas raízes, o cultivar TMG 1066 RR apresentou comportamento similar ao cultivar VMAX RR e ainda, obteve valores 65% e 122% superiores aos verificados para os cultivares NA 5909 RG e BRS 360 RR, respectivamente (Tabela 3). Quanto à parte aérea, os teores de Rb nos genótipos seguiram a ordem decrescente, em que TMG 1066 RR ≥ NA 5909 RG ≥ BRS 360 RR = VMAX RR.

Há evidências quanto aos efeitos indiretos da interferência de Rb a nível celular, como por exemplo, na regulação do potencial osmótico da célula e na ativação enzimática (NITSOS; EVANS, 1969; MARSCHNER, 2012), o que pode explicar, em partes, a maior produção de massa de matéria seca de raiz e parte aérea, bem como o acúmulo de Rb nessas mesmas partes da planta, para a concentração de Rb de 2,5 mmol L^{-1}.

Tabela 3 - Teor e acúmulo de Rb nas raízes (RA) e parte aérea (PA) de cultivares de soja submetidos a duas concentrações de Rb na solução nutritiva, no estádio V5

Rb (mmol L^{-1})	Cultivares	Teor Rb RA	Teor Rb PA	Acúmulo Rb RA	Acúmulo Rb PA
		-------- g kg^{-1} --------		------- g $vaso^{-1}$ -------	
0,2	TMG 1066 RR	5,43 a	2,70 a	0,0035 b	0,0166 bc
	VMAX RR	4,18 a	2,52 a	0,0037 b	0,0151 c
	NA 5909 RG	4,06 a	3,13 a	0,0026 b	0,0204 a
	BRS 360 RR	4,73 a	2,51 a	0,0053 a	0,0186 ab
	CV (%)*	23,26	17,89	13,53	5,57
	DMS**	2,35	1,07	0,0011	0,0021
2,5	TMG 1066 RR	25,01 a	12,42 a	0,0178 b	0,0693 a
	VMAX RR	23,75 a	8,49 b	0,0286 a	0,0765 a
	NA 5909 RG	15,13 b	10,46 ab	0,0116 c	0,0731 a
	BRS 360 RR	11,25 c	9,64 b	0,0118 c	0,0807 a
	CV (%)*	6,51	9,59	9,91	7,74
	DMS**	2,70	2,17	0,0038	0,0128

Médias seguidas por letras distintas diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade
*CV (%) = coeficiente de variação
**DMS = diferença mínima significativa

Para o acúmulo de Rb nas plantas, o qual foi calculado por meio da multiplicação da massa de matéria seca com o teor de Rb na respectiva parte da planta, houve influência genotípica no acúmulo de Rb nas raízes ($P<0,01$) e na parte área ($P<0,01$) em cada concentração de Rb utilizado, exceto para o acúmulo de Rb na parte aérea no suprimento mais alto de Rb (Tabela 3). Na concentração baixa de Rb, verificou-se que o cultivar BRS 360 RR obteve maior acúmulo de Rb nas raízes (0,0053 mg $vaso^{-1}$) quando comparado aos demais cultivares (0,0037; 0,0035; 0,0026 mg $vaso^{-1}$, respectivamente para VMAX RR, TMG 1066 RR e NA 5909 RG) e para o acúmulo de Rb na parte aérea, nesta mesma concentração, o cultivar NA 5909 RG obteve maior acúmulo de Rb (0,0204 mg $vaso^{-1}$), seguido dos cultivares BRS 360 RR, TMG 1066 RR e VMAX RR, respectivamente 0,0186; 0,0166; 0,0151 mg $vaso^{-1}$ (Tabela 3). Por outro lado, sob condições de suprimento alto de Rb, notou-se que o cultivar VMAX RR acumulou maior quantidade do elemento nas raízes (0,0286 mg $vaso^{-1}$), valor este 60%, 142% e 145% superior aos cultivares TMG 1066 RR, BRS 360 RR e NA 5909 RG, respectivamente (Tabela 3).

As equações ajustadas para os cálculos dos parâmetros cinéticos de absorção de Rb ($V_{máx}$ e K_m) são apresentadas na Tabela 4, e as curvas de depleção do elemento na solução nutritiva em função do período experimental estão contidas na Figura 4. Verificou-se que a concentração de Rb nas primeiras coletas de alíquota de solução foi reduzida com o passar do tempo experimental de forma linear e que para as coletas seguintes, o melhor ajuste foi o modelo potencial. Ainda, na baixa concentração de Rb, o modelo linear foi ajustado para as coletas que ocorreram até a primeira hora (Figura 4A), e sob condições de maior suprimento do elemento, o modelo linear ajustou-se somente até os 30 minutos iniciais de coleta (Figura 4B).

Tabela 4 - Equações ajustadas para as curvas de depleção de Rb utilizadas para os cálculos dos parâmetros cinéticos de absorção por cultivares de soja submetidos a duas concentrações de Rb na solução nutritiva, no estádio V5

Rb (mmol L^{-1})	Cultivares	Equação	Modelo	Coeficiente de Determinação
0,2	TMG 1066 RR	Q = 430,9350 -93,1800 * t	Linear	R2 = 0,996
		Q = 482,5560 * t^-0,6590	Potencial	R2 = 0,904
	VMAX RR	Q = 422,8160 -116,0880 * t	Linear	R2 = 0,992
		Q = 462,4475 * t^-0,7131	Potencial	R2 = 0,927
	NA 5909 RG	Q = 438,2340 -101,4840 * t	Linear	R2 = 0,983
		Q = 543,7674 * t^-0,6618	Potencial	R2 = 0,899
	BRS 360 RR	Q = 418,6440 -110,4040 * t	Linear	R2 = 0,998
		Q = 521,4213 * t^-0,8902	Potencial	R2 = 0,876
2,5	TMG 1066 RR	Q = 5110,4000 -1005,4400 * t	Linear	R2 = 0,985
		Q = 5082,2777 * t^-0,2771	Potencial	R2 = 0,828
	VMAX RR	Q = 5129,7980 -1032,0880 * t	Linear	R2 = 0,990
		Q = 5241,6744 * t^-0,2967	Potencial	R2 = 0,817
	NA 5909 RG	Q = 5356,1850 -1412,7400 * t	Linear	R2 = 0,986
		Q = 5124,8964 * t^-0,2544	Potencial	R2 = 0,809
	BRS 360 RR	Q = 5387,9250 -1717,7400 * t	Linear	R2 = 1,000
		Q = 5145,4596 * t^-0,2918	Potencial	R2 = 0,798

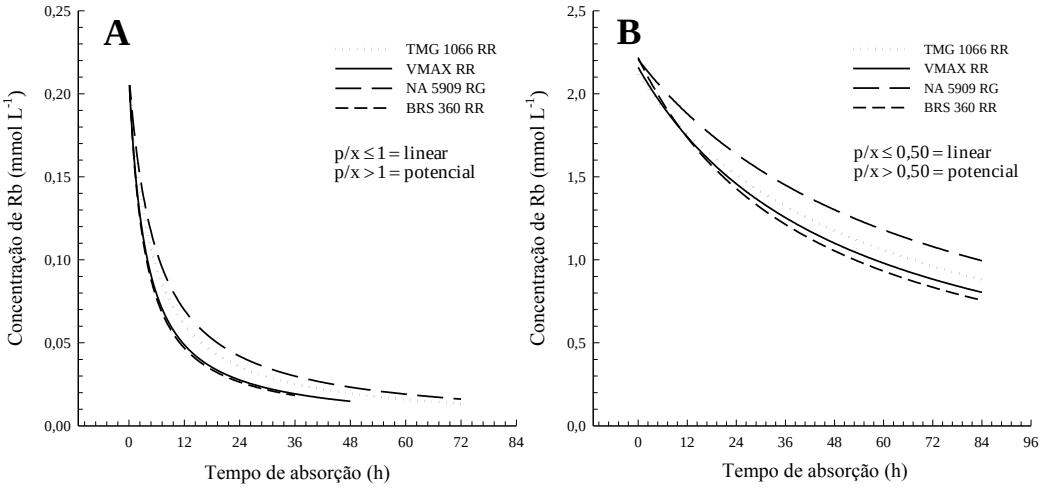

Figura 4 - Curvas de depleção de Rb para as concentrações de 0,2 mmol L^{-1} (A) e 2,5 mmol L^{-1} de Rb (B) em função do tempo de coleta das alíquotas de solução nutritiva, no estádio V5

Quanto ao influxo máximo ($V_{máx}$) de Rb nas raízes dos quatro cultivares, houve diferença significativa (*P<0,01*) entre genótipos nas duas concentrações de Rb estudadas (Tabela 5). Os valores médios de $V_{máx}$ na concentração baixa do elemento para o TMG 1066 RR, VMAX RR, NA 5909 RG e BRS 360 RR, foram, respectivamente, de 0,15; 0,21; 0,14 e 0,13 mmol g^{-1} h^{-1}, ao passo que os respectivos valores de $V_{máx}$ para o fornecimento alto de Rb foram 1,02; 0,79; 1,48 e 1,58 mmol g^{-1} h^{-1}. Verificou-se ainda que a ordem do $V_{máx}$ foi inversa entre as concentrações de Rb, ou seja, para a dose 0,2 mmol L^{-1} o cultivar VMAX RR obteve maior valor de $V_{máx}$, enquanto que na maior dose, este mesmo cultivar obteve o menor valor de $V_{máx}$, similaridade esta também encontrada para os demais cultivares. Estes resultados sugerem que o genótipo VMAX RR, sob condições de baixa disponibilidade de K no solo, possui maior quantidade de sítios de absorção do transportador. Em contrapartida, o genótipo BRS 360 RR tem capacidade de absorver K com maior velocidade em solos com concentrações adequadas de K.

Os valores médios da constante de Michaelis-Menten (K_m) também estão descritos na Tabela 5 e as isotermas para alta e baixa afinidade pelos transportadores iônicos de Rb^+ (K^+) são apresentadas na Figura 5. Houve diferença estatística (*P<0,01*) para a K_m somente na dose mais alta de Rb (Tabela 5). Nesta concentração, o genótipo VMAX RR apresentou menor valor de K_m, seguido pelos genótipos TMG 1066 RR, NA 5909 RG e BRS 360 RR, respectivamente, 2,04; 2,08; 2,20 e 2,35 mmol L^{-1}, pressupondo que os primeiro cultivares quando cultivados sob condições adequadas de K no solo, apresentam transportadores

atuando em baixa afinidade pelos íons K^+. Para a concentração baixa do elemento, os valores de K_m entre os cultivares foram muito próximos, 0,12; 0,11; 0,11 e 0,10, respectivamente para VMAX RR, TMG 1066 RR, NA 5909 e BRS 360 RR, também não exibindo valores discrepantes e mostrando similaridade entre os genótipos para este parâmetro cinético.

Pyo et al. (2010) verificaram variação genotípica para os parâmetros de absorção em plantas de *Arabidopsis thaliana* supridas com 1,75 mmol L^{-1} de Rb. Os valores de $V_{máx}$ variaram entre 0,33 e 1,97 µmol g^{-1} massa fresca h^{-1}, enquanto que os valores para K_m foram observados na faixa de 21,3 a 82,6 µmol. Valores distintos de $V_{máx}$ e K_m quanto à utilização de diferentes genótipos também foram relatado por Winkler e Zotz (2010). Para quatro espécies distintas de plantas da família Bromeliaceae, esses autores sugeriram valores de $V_{máx}$ entre 14,9 e 40,2 nmol h^{-1} g^{-1} e K_m 32,4 a 52,4 µmol para concentrações abaixo de 1 mmol L^{-1}, e para concentrações acima de 10 mmol L^{-1}, verificaram valores de $V_{máx}$ entre 5,1 e 18,7 nmol h^{-1} g^{-1} e K_m 25,0 a 56,5 µmol.

Tabela 5 - Valores médios dos parâmetros cinéticos ($V_{máx}$, K_m e $C_{mín}$) estimados a partir da absorção de Rb por cultivares de soja submetidos a duas concentrações de Rb na solução nutritiva, no estádio V5

Rb (mmol L^{-1})	Cultivares	$V_{máx}$	K_m	$C_{mín}$ *
		mmol g^{-1} h^{-1}	mmol L^{-1}	µmol L^{-1}
0,2	TMG 1066 RR	0,15	0,11	3,58
	VMAX RR	0,21	0,12	2,60
	NA 5909 RG	0,14	0,11	4,15
	BRS 360 RR	0,13	0,10	2,34
2,5	TMG 1066 RR	1,02	2,08	---
	VMAX RR	0,79	2,04	---
	NA 5909 RG	1,48	2,20	---
	BRS 360 RR	1,58	2,35	---

* Não determinado para a concentração de 2,5 mmol L^{-1}

Notou-se ainda que à concentração mínima ($C_{mín}$), correspondente a concentração de Rb na solução, na qual o influxo iguala-se ao efluxo (CLAASSEN; BARBER, 1974), foi atingida em diferentes períodos experimentais para a concentração 0,2 mmol L^{-1} de Rb (Figura 4A), havendo ainda diferença significativa entre genótipos ($P<0,01$), com valores para BRS 360 RR, VMAX RR, TMG 1066 RR e NA 5909 RG, respectivamente, de 2,34; 2,60; 3,58 e 4,15 µmol L^{-1} (Tabela 5). Contudo, na concentração de 2,5 mmol L^{-1} de Rb

(Figura 4B), mesmo após 84 horas de exposição das plantas ao elemento, o influxo não se igualou efluxo, restando ainda cerca de 1 mmol L^{-1} de Rb em solução.

Os mecanismos de afinidade dos transportadores pelo íon Rb^+ (K^+) foram definidos por meio da utilização de faixas de concentração acima e abaixo de 1,0 mmol L^{-1} (MACHADO; FURLANI, 2004), e são apresentados na Figura 5. Para a concentração de 0,2 mmol L^{-1} de Rb, foi verificada a presença de carregadores atuando em alta afinidade pelo íon, ao passo que para a concentração alta do elemento, predominou a operação de carregadores de baixa afinidade (Figura 5).

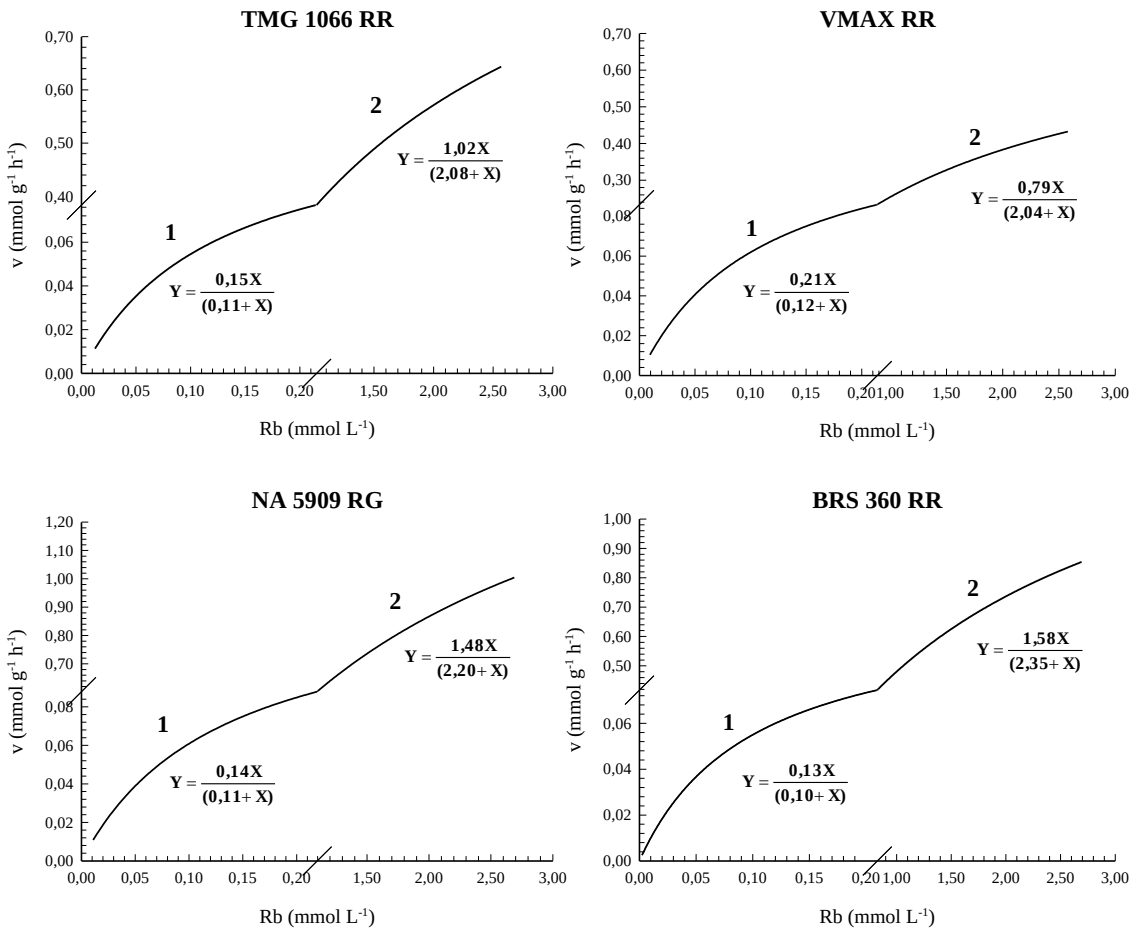

Figura 5 - Velocidade de absorção de Rb e a participação dos mecanismos de absorção de alta (1) e baixa (2) afinidade por cultivares de soja submetidos à duas concentrações de Rb na solução nutritiva, no estádio V5

Winkler e Zotz (2010), estudando a eficiência de absorção de K por plantas pertencentes à família Bromeliaceae, encontraram faixas de concentração para alta e baixa afinidade de Rb^+ muito superiores as verificadas neste trabalho. Concentrações de Rb abaixo de 1 mmol L^{-1} representaram o mecanismo de alta afinidade, ao passo que concentrações acima de 10 mmol L^{-1} proporcionaram atuação de transportadores de baixa afinidade. Por outro lado, Epstein, Rains e Elzam (1963) verificaram, para plantas de cevada, valores próximos aos sugeridos neste trabalho, na ordem de 0,2 e 1,0 mmol L^{-1} de Rb, respectivamente para atuação de transportadores de alta e baixa afinidade.

Sabe-se que cultivares eficientes quanto a absorção de nutrientes comumente apresentam altos valores de $V_{máx}$ e baixos valores de K_m (NIELSEN; BARBER, 1978; LAVRES JUNIOR, 2007). Contudo, os resultados obtidos no presente estudo apontam que genótipos com altos valores de $V_{máx}$ também apresentaram altos valores de K_m, propondo que, apesar dessas plantas absorverem K rapidamente, é necessário que haja adequado suprimento do nutriente no substrato devido a atuação de carregadores de baixa afinidade pelos íons K^+ (Tabela 5).

Similarmente ao verificado neste trabalho, Sacramento e Rosolem (1997) avaliando quatro cultivares de soja quanto a eficiência de absorção de K, não obtiveram resultados de $V_{máx}$ e K_m na ordem sugerida (alto $V_{máx}$ e baixo K_m) por Nielsen e Barber (1978) e por Lavres Junior (2007). Embora o cultivar FT 2 tenha apresentado o maior valor de $V_{máx}$ perante aos demais cultivares, não foi verificado o menor valor de K_m para este cultivar (SACRAMENTO; ROSOLEM, 1997). Moreira et al. (2003) verificaram o maior valor de $V_{máx}$ e K_m para absorção de Zn e Mn, respectivamente para os cultivares IAC 17 e FT Estrela, sob condições de suprimento de 1 e 3 mmol L^{-1} de Zn e Mn. No estudo de Sanes et al. (2013) com 11 cultivares de arroz, os autores verificaram que o cultivar BRS Atalanta obteve maior eficiência de absorção de K (maior valor de $V_{máx}$), porém com valor de K_m 60% maior se comparado aos demais cultivares, indicando a atuação de transportadores de K de baixa afinidade.

Sacramento e Rosolem (1997), em estudo de cinética de absorção de K na soja, concluíram que valores distintos dos parâmetros cinéticos $V_{máx}$, K_m e $C_{mín}$ são conseqüência do estado nutricional, da idade da planta e da variação genotípica.

2.4 Conclusão

Existem diferenças genotípicas para os valores de comprimento, superfície e volume de raízes, bem como na produção de massa seca de raízes, parte aérea e acúmulo de Rb nestes órgãos.

Sob baixo suprimento de K (e Rb), o cultivar BRS 360 RR é mais eficiente, ao passo que sob alta disponibilidade do elemento, o cultivar VMAX RR é mais eficiente.

Não foram verificadas diferenças para os parâmetros cinéticos de absorção de Rb entre cultivares TCD e TCI.

Referências

ALVES, V. M. C.; PARENTONI, S. N.; VASCONCELLOS, C. A.; PITTA, G. V. E.; FRANÇA, C. C. M. Cinética de absorção de fósforo e crescimento do sistema radicular de genótipos de milho contrastantes para eficiência a fósforo. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v. 1, p. 85-92, 2002.

ANDRADE, G. J. M.; ROSOLEM, C. A. Absorção de manganês em soja RR sob efeito do glyphosate. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, p. 961-968, 2011.

ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMIST - AOAC. **Official methods of analysis**. Official Method 999.10. Washington, DC, 2000.

BARBER, S. A. The role of root interception, mass-flow and diffusion in regulating the uptake of ions from soils. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY - IAEA. **Limiting steps in ion uptake by plants from soil.** Vienna, 1966. p. 39-45. (Technical Report Series, 65).

BARBER, S. A. Mechanisms of potassium absorption by plants: In: DINAUER, R.C. (Ed.). **The role of potassium in agriculture**. Madison, WI: ASA-CSSA-SSSA, 1968. p. 293-310.

BARBER, S. A. **Soil nutrient bioavailability**: a mechanistic approach. New York: John Wiley and Sons, 1984. 398 p.

BARBER, S. A. Potassium availability at the soil-root interface and factors influencing potassium uptake. In: MUNSON, R. D. (Ed.). **Potassium in agriculture**. Madison, WI: ASA-CSSA-SSSA, 1985. p. 309–324.

BARBER, S. A. **Soil nutrient bioavailability**: a mechanistic approach. New York: John Wiley and Sons, 1995. 414 p.

BENGOUGH, A. G.; MULLINS, C. E. Mechanical impedance to root growth: a review of experimental techniques and root growth responses. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 41, p. 341-358, 1991.

BOHM, W. **Methods of studying root system**. Berlim: Spring Verlag, 1979. 187 p.

BORKERT, C. M.; CASTRO, C.; OLIVEIRA, F. A.; KLEPKER, D.; OLIVEIRA JUNIOR, A de. O potássio na cultura da soja. In: YAMADA, T.; ROBERTS, T. L. (Ed.). **Potássio na agricultura brasileira**. Piracicaba: POTAFOS, 2005. p. 671-713.

BOX JUNIOR, J. E. Modern methods for root investigations. In: WAISEL, Y.; ESHEL, A.; KAFKAFI, U. (Ed.). **Plant roots**: the ridden half. 2. ed. New York: Marcel Dekker, 1996. cap. 10, p. 193-237.

CALVACHE, M.; PINO, I.; BUNEDER, M. Posibilidades de uso de Rb-85 como trazador de potasio. **Nucleotecnica**, Santiago, v. 10, p. 43-45, 1990.

CLAASSEN, N.; BARBER, S. A. A method for characterizing the relation between nutrient concentration and flux into roots of intact plants. **Plant Physiology**, Rockville, v. 54, p. 564-568, 1974.

CLARKSON, D. T. Factors affecting mineral nutrient acquisition by plants. **Annual Review of Plant Physiology**, Palo Alto, v. 36, p. 77-115, 1985.

CANAL, I. C.; MIELNICZUK, J. Parâmetros de absorção de potássio em milho (*Zea mays* L.) afetados pela interação alumínio-cálcio. **Ciência e Cultura**, São Paulo, v. 35 p. 336-340, 1983.

CARADUS, J. R. Mechanisms improving nutrient use by crop and herbage legume. In: BALIGAR, V. C.; DUNCAN, R. R. (Ed.). **Crops as enhancers of nutrient use**. San Diego: Academic Press, 1990. p. 253-311.

COSTA, C.; DWYER, L. M.; ZHOU, X.; DUTILLEUL, P.; HAMEL, C.; REID, L. M.; SMITH, D. L. Root morphology of contrasting maize genotypes. **Agronomy Journal**, Madison, v. 94, p. 96-101, 2002.

COSTA, N. L.; SILVA FILHO, G. N.; SENA, J. O. A.; RODRIGUES, A. N. A.; ANGHINONI, I. Mecanismos de suprimento e eficiência de absorção de potássio em soja, milho, milheto, colza e lab-lab. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 23, p. 463-468, 1988.

DECHEN, R. A.; NACHTIGALL, G. R. Elementos essenciais e benéficos às plantas superiores. In: FERNANDES, M. S. **Nutrição mineral de plantas**. Viçosa: SBCS, 2006. p. 1-5.

DUNCAN, R. R.; BALIGAR, V. C. Genetics, breeding and physiological mechanisms of nutrient uptake and use efficiency: an overview. In: BALIGAR, V. C.; DUNCAN, R. R. **Crops as enhancers of nutrient use**. San Diego: Academic Press, 1990. p. 3-35.

EPSTEIN, E.; BLOOM, A. J. **Nutrição mineral de plantas**: princípios e perspectivas. 2. ed. Londrina: Planta, 2006. 403 p.

EPSTEIN, E.; HAGEN, C. E. A kinetic study of the absorption of alkali cations by barley roots. **Plant Physiology**, Rockville, v. 27, p. 457-474, 1952.

EPSTEIN, E.; RAINS, D. W.; ELZAM, O. E. Resolution of dual mechanisms of potassium absorption by barley roots. **Proceedings of the National Academy of Science of the USA**, Washington, DC, v. 49, p. 684-692, 1963.

ERDEI, L.; TRIVEDI, S. Cesium/potassium selectivity in wheat and lettuce of different K+ status. **Plant Physiology**, Rockville, v. 138, p. 696-699, 1991.

ERNANI, P. R.; ALMEIDA, J. A. de; SANTOS, F. C. dos. Potássio. In: NOVAIS, R. R. et al. **Fertilidade do solo**. Viçosa: SBCS, 2007. cap. 9, p. 552-594.

FAGERIA, N. K. Micronutrients' influence on root growth of upland rice, common bean, corn, wheat, and soybean. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 25, n. 3, p. 613-622, 2002.

FAGERIA, N. K.; MOREIRA, A. The role of mineral nutrition on root growth of crop plants. **Advances in Agronomy**, New York, v. 110, p. 251-331, 2011.

FATTORE, N.; ANGHINONI, I. Eficiência de absorção de nutrientes por espécies forrageiras de inverno. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 27, p. 251-258, 1992.

FOX, T. C.; GUERINOT, M. L. Molecular biology of cátion transport in plants. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, Palo Alto, v. 49, p. 669-696, 1998.

GLASS, A. D. M. Regulation of ion transport. **Annual Review of Plant Physiology**, Palo Alto, v. 34, p. 311-326, 1983.

HABIB, R. Total root length as estimated from small sub-samples. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 108, p. 267-274, 1988.

HAVLIN, J. L.; TISDALE, S. L.; BEATON, J. D.; NELSON, W. L. **Soil fertility and fertilizers:** an introduction to nutrient management. 7. ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall, 2005. 515 p.

HILLE, B. A. K^+ channel worthy of attention. **Science**, Washington, DC, v. 273, p. 1677, 1996.

HOAGLAND, D. R.; ARNON, D. I. **The water-culture method for growing plants without soil**. Berkeley: California Agricultural Experiment Station, 1850. 32 p. (Circular, 347).

HUNT, R. **Plant growth analysis**. London: Edward Arnold Limited, 1978. 67 p.

JUNGK, A. O. Dynamics of nutrient movement at the soil-root interface. In: WAISEL, Y.; ESHEL, A.; KAFKAFI, U. (Ed.). **Plant roots**: the ridden half. 2. ed. New York: Marcel Dekker, 1996. cap. 27, p. 529-556.

LAVRES JUNIOR, J. **Influência genotípica na absorção, utilização e na toxidez de manganês na soja**. 2007. 88 p. Tese (Doutorado em Ciências) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

LAVRES JUNIOR, J.; MONTEIRO, F. A. Perfilhamento, área foliar e sistema radicular do capim-Mombaça submetido a combinações de doses de nitrogênio e potássio. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Brasília, DF, v. 32, n. 5, p. 1068-1075, 2003.

LAVRES JUNIOR, J. ; MORAES, M. F. ; CABRAL, C. P.; MALAVOLTA, E. Influência genotípica na absorção e na toxidez de manganês em soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 173-181, 2008.

LEONARD, R. T. Absorption of potassium into root cells. In: MUNSON, R. D. (Ed.). **Potassium in agriculture**. Madison, WI: ASA-CSSA-SSSA, 1985. p. 327-335.

LIMA, A. M. N.; NEVES, J. C. L.; SILVA, I. R.; LEITE, F. P. Cinética de absorção e eficiência nutricional de K+, Ca2+ e Mg2+ em plantas jovens de quatro clones de eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 6, p. 903-909, 2005.

LÖPPERT, H. Energy coupling for membrane hyperpolarization in *Lemna*: Respiration rate, ATP level and membrane potential at low oxygen concentrations. **Planta**, Berlin, v. 159, p. 329-335, 1983.

MAATHUIS, F. J. M.; SANDERS, D. Regulation of K^+ absorption in plant root cells by external K^+: interplay of different plasma membrane K^+ transporters. **Journal of Experimental Botany**, London, v. 48, p. 451-458, 1997.

MACHADO, C. T. de T.; FURLANI, A. M. C. Kinetics of phosphorus uptake and root morphology of local and improved varieties of maize. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 61, n. 1, p. 69-76, 2004.

MALAVOLTA, E. Potássio: absorção, transporte e redistribuição na planta. In: YAMADA, T.; ROBERT, T. L. (Ed.). **Potássio na agricultura brasileira**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 2005. p. 179-238.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas.** São Paulo: Editora Agronômica Ceres, 2006. 638 p.

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

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2. ed. London: Academic Press, 1995. 889 p.

MARSCHNER, P. (Ed.). **Marschner's mineral nutrition of higher plants**. 3. ed. San Diego: Academic Press, 2012. 651 p.

MARTINS, P. O. **Cinética de absorção de silício por cultivares de cana-de-açúcar e de arroz**. 2010. 67 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Botucatu, 2010.

MARTINS, P. O.; CRUSCIOL, C. A. C.; PILON, C. Kinetic parameters of silicon uptake by rice cultivars. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 1, p. 147-158, 2012.

MELO, V. F.; CASTILHOS, R. M. V.; PINTO, L. F. S. Reserva mineral do solo. In: MELO, V. F.; ALLEONI, L. R. F. (Ed.). **Química e mineralogia do solo**; conceitos básicos. Viçosa: SBCS, 2009. p. 251-332.

MEURER, E. J. Potássio. In: FERNANDES, M. S. (Ed.). **Nutrição mineral de plantas**. Viçosa: SBCS, 2006. cap. 11, p. 281-298.

MEURER, E. J. Fatores que influenciam o crescimento e o desenvolvimento das plantas. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: SBCS, 2007. cap. 4, p. 133-204.

MOREIRA, A.; MALAVOLTA, E.; HEINRICHS, R.; TANAKA, R. T. Influência do magnésio na absorção de manganês e zinco por raízes destacadas de soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 38, p. 95-101, 2003.

MORITSUGU, M.; SHIBASAKA, M.; KAWASAKI, T. Where is the most important and efficient site for absorption and translocation of cations in excised barley roots? **Soil Science and Plant Nutrition**, Tokyo, v. 39, p. 299-307, 1993.

NAKAOJI, K.; HARADA, H.; WAKIUCHI, N.; SUEYOSHI, K.; OJI, Y.; SHIGA, H. Proton-translocating inorganic pyrophosphatase in tonoplast vesicles from barley roots. **Japanese Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, Tokyo, v. 62, p. 393-398, 1991.

NIELSEN, N. E.; BARBER, S. A. Differences among genotypes of corn in the kinetics of P uptake. **Agronomy Journal**, Madison, v. 70, p. 695-698, 1978.

NITSOS, R. E.; EVANS, H. J. Effects of univalent cations on the activity of particulate starch synthetase, **Plant Physiology**, Rockville, v. 44, p. 1260–1266, 1969.

NYE, P. H.; TINKER, P. B. The uptake properties of the root system in solution. In: NYE, P. H.; TINKER, P. B. (Ed.). **Solute movement in the soil-root system**. 1. ed. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1977. cap. 5, p. 92-126.

NOORDWIJK, M. V.; FLORIS, J. Loss of dry weight during washing and storage of root samples. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 53, p. 239-243, 1979.

PETRAGLIA, T.; POOLE, R. J. Eletrogenic pump activity in red beet: Its relation to ATP levels and to cation influx. **Journal of Membrane Biology**, Heidelberg, v. 55, p. 165-174, 1980.

POTTOSIN, I. I.; ANDJUS, P. R. Depolarization activated K^+ channel. **Plant Physiology**, Rockville, v. 106, p. 313-319, 1994.

PYO, Y.; GIERTH, M.; SCHROEDER, J. I.; CHO, M. H. High-affinity K^+ transport in Arabidopsis: AtHAK5 and AKT1 are vital for seedling establishment and postgermination growth under low K+ conditions. **Plant Physiology**, Rockville, v. 153, p. 863–875, 2010.

REID, R. J. Kinetics of nutrient uptake by plant cells. In: RENGEL, Z. (Ed.). **Mineral nutrition of crops**: fundamental mechanisms and implications. 1.ed. New York: Food Products Press, 1999. cap. 2, p. 41-66.

ROSA, C. M. da; CASTILHOS, R. M. V.; VAHL, L. C.; CASTILHOS, D. D.; PINTO, L. F. S.; OLIVEIRA, E. S.; LEAL, O. dos A. Efeito de substâncias húmicas na cinética de absorção de potássio, crescimento de plantas e concentração de nutrientes em *Phaseolus vulgaris* L. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 4, p. 959-967, 2009.

ROSHANI, G. A.; NARAYANASAMY, G. Determination of kinetic parameters for potassium uptake by wheat at different growth stages. **International Journal of Plant Production**, Gorgan, v. 4, n. 1, p. 33-40, 2010.

ROSOLEM, C. A.; ROSSETO, C. A. V.; FERNANDES, D. M.; ISHIMURA, I. Potassium fertilization, root morphology and potassium absorption by soybean. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 16, p. 479-492, 1993.

ROSOLEM, C. A.; MATEUS, G. P.; GODOY, L. J. G.; FELTRAN, J. C.; BRANCALIÃO, S. R. Morfologia radicular e suprimento de potássio às raízes de milheto de acordo com a disponibilidade de água e potássio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 5, p. 875-884, 2003.

ROSOLEM, C. A. Interação do potássio com outros íons. In: YAMADA, T.; ROBERT, T. L. (Ed.). **Potássio na agricultura brasileira**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 2005. p. 239-260.

RUBIO, F.; GASSMAN, W.; SCHROEDER, J. I. Sodium-driven potassium uptake by the plant potassium transporter HKT1 and mutations conferring salt tolerance. **Science**, Washington, DC, v. 270, p. 1660-1663, 1995.

RUIZ, H. A. Estimativa dos parâmetros cinéticos, Km e Vmax por uma aproximação gráfico-matemática. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 32, p. 79-84, 1985.

RUIZ, H. A.; FERNANDES FILHO, E. I. Cinética: Software para estimar as constantes Vmax e Km da equação de Michaelis-Menten. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 20., 1992, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: SBCS, 1992. p. 124-125.

RUIZ, H. A.; MIRANDA, J.; CONCEIÇÃO, J. C. S. Contribuição dos mecanismos de fluxo de massa e de difusão para o suprimento de K, Ca e Mg a plantas de arroz. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, p. 1015-1018, 1999.

SACRAMENTO, L. V.; ROSOLEM, C. A. Cinética de absorção de potássio e seus ajustes em plantas de soja em função da idade e estado nutricional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 21, p. 213-219, 1997.

SANES, F. S. M.; CASTILHOS, R. M. V.; SCIVITTARO, W. B.; VAHL, L. C.; MORAIS, J. R. Morfologia de raízes e cinética de absorção de potássio em genótipos de arroz irrigado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 3, p. 688-697, 2013.

SARQUIS, J. I.; JORDAN, W. R.; MORGAN, P. W. Ethylene evolution from maize seedling roots in response to mechanical impedance. **Plant Physiology**, Rockville, v. 96, p. 1171-1177, 1991.

SAS Institute. **SAS/STAT**. User's guide, version 6.11. 4. ed. Cary, NC: Statistical Analysis System Institute, 1996. v. 2, 842 p.

SCHACHTMAN, D. P.; SCHROEDER, J. I. Structure and transport mechanism of a high-affinity potassium uptake transporter from higher plants. **Nature**, London, v. 370, p. 655–658, 1994.

SCHENK, M. K.; BARBER, S. A. Phosphate uptake by corn as affected by soil characteristics and root morphology. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 43, p. 880-883, 1979.

SIDDIQI, M. Y.; GLASS, A. D. M. Simultaneous consideration of tissue and substrate potassium concentration in K^+ uptake kinetics: A model. **Plant Physiology**, Rockville, v. 69, p. 283-285, 1982.

SILBERBUSH, M.; BARBER, S. Sensitivity of simulated phosphorus uptake to parameters used by a mechanistic-mathematical model. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 74, n. 1, p. 93-100, 1983.

VILELA, L.; ANGHINONI, I. Morfologia do sistema radicular e cinética da absorção de fósforo em cultivares de soja afetados pela interação alumínio-fósforo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 8, p. 91-96, 1984.

WIEBE, H. H.; KRAMER, P. J. Translocation of radioactive isotopes from various regions of roots of barley seedlings. **Plant Physiology**, Rockville, v. 29, p. 342-348, 1954.

WINKLER, U.; ZOTZ, G. And then there were three: highly efficient uptake of potassium by foliar trichomes of epiphytic bromeliads. **Annals of Botany**, Oxford, v. 106, p. 421-427, 2010.

3. Transporte e redistribuição de potássio por cultivares de soja com tipo de crescimento indeterminado

Resumo – A seleção de genótipos eficientes quanto à utilização de potássio (K) é uma ferramenta importante para posicionar cultivares de soja em locais onde há baixa disponibilidade de K no solo. Objetivou-se com este trabalho avaliar a eficiência de utilização de K por meio da utilização de cultivares de soja com tipo de crescimento determinado (TCD) e indeterminado (TCI). O estudo foi desenvolvido sob condições de casa de vegetação no Centro de Energia Nuclear na Agricultura, da Universidade de São Paulo, no período de setembro de 2012 a janeiro de 2013. Foram utilizados um cultivar de soja com TCD (TMG 1066 RR) e outros três com TCI (VMAX RR, NA 5909 RG e BRS 360 RR), sob condições de baixo e adequado suprimento de K (1,0 e 6,0 mmol L^{-1}) na solução nutritiva, com adição de rubídio (Rb) à 20%, na forma de RbCl, objetivando traçar o K na planta. As aplicações de RbCl foram realizadas em cinco diferentes tratamentos: na solução nutritiva no estádio V1; na solução nutritiva no estádio V4; nas folhas no estádio V4; na solução nutritiva no estádio R2; nas folhas no estádio R2; O delineamento experimental foi de blocos ao acaso, com duas concentrações de K, cinco tratamentos de Rb, quatro cultivares e três repetições, totalizando 120 unidades experimentais. Na ocasião do florescimento (estádio R2) foi realizada análise de putrescina nas folhas de soja, e na colheita (estádio R8), as plantas foram divididas em raízes, caules e pecíolos, limbos, pericarpos e grãos. Posteriormente, foram obtidos os valores de produção de grãos e a partir das análises químicas dos tecidos vegetais, calculou-se o acúmulo de K e Rb, a distribuição percentual de Rb, o transporte à longa distância de K e a eficiência de utilização de K (EUtK). Houve interação significativa ($P<0,01$) entre genótipos e tratamentos de Rb para as variáveis produção de grãos, putrescina, acúmulo de K e Rb, redistribuição de Rb, transporte a longa distância e EUtK. Os cultivares TMG 1066 RR e VMAX RR possuem maior eficiência em produção e utilização de K. Não foram verificadas diferenças quanto ao acúmulo e redistribuição de K para cultivares TCD e TCI.

Palavras-chave: Eficiência de utilização. Compartimentação. Rubídio.

Transport and redistribution of potassium by soybean cultivars with indeterminate growth type

Abstract – The selection of genotypes for potassium (K) use efficiency (KUE) is an important tool for positioning soybean cultivars in places where there is low K availability in the soil. The objective of this study was to evaluate the KUE by growing soybean cultivars with determinate growth type (DGT) and indeterminate growth type (IGT). The study was carried out under greenhouse conditions at the Center for Nuclear Energy in Agriculture, University of São Paulo, in the period from September 2012 to January 2013. One DGT cultivar (TMG 1066 RR) and three IGT cultivars (VMAX RR, NA RG 5909 and BRS 360 RR) were growth under conditions of low and adequate K supply (1.0 and 6.0 mmol L^{-1}) in the nutrient solution with the addition of 20% of rubidium (Rb) in the form of RbCl aiming to localize the K in the plant. The applications of RbCl were performed in five different treatments: I) in the nutrient solution on V1 phenological growth stage, II) in the nutrient solution on V4 phenological growth stage, III) in the leaves on V4 phenological growth stage, IV) in the nutrient solution on the R2 phenological growth stage, and V) in the leaves on R2 phenological growth stage. The experimental design was a randomized block design with two K rates, five treatments of Rb, four cultivars and three replications, totaling 120 experimental units. At the time of flowering (R2 stage) putrescine analysis was performed on the soybean leaves. At harvest (stage R8) the plants were divided into roots, stems and petioles; leaf blades, pericarp and grain. Afterwards, the values of grain yield were obtained and from chemical analyzes of plant tissues, it was calculated the K and Rb accumulations, the percentage distribution of Rb, the long-distance transport of K, and K use efficiency (KUE). There was a significant interaction ($P<0.01$) among genotypes and application forms of Rb for grain yield, putrescina content, K and Rb accumulation , Rb redistribution , long distance transport and KUE. The TMG 1066 RR and VMAX RR cultivars have shown higher yield and KUE. No differences were found concerning the accumulation and redistribution of K for the cultivars DGT and IGT.

Keywords: Utilization efficiency. Partitioning. Rubidium.

3.1 Introdução

O potássio (K) absorvido pelas raízes é transportado até o xilema prioritariamente pela via simplástica, devido ao impedimento da via apoplástica causada pelas estrias de Cáspari na região da endoderme (MENGEL, 1985; MALAVOLTA, 2005). Neste caminho, há presença de um canal contínuo de comunicação, denominado plasmodesmos, que se inicia desde as células superficiais das raízes, percorrendo a endoderme até atingir o xilema (LÄUCHLI; PFLÜGER, 1978), permitindo, finalmente, que os íons K^+ sejam transportados para órgãos de residência. Esse transporte inicial tem caráter ativo e é coordenado pelo potencial eletroquímico entre as células do xilema e as células parenquimáticas (LÄUCHLI; PFLÜGER, 1978).

No interior da planta, o K movimenta-se na corrente transpiratória via apoplasto e simplásto (MENGEL, 1985; MALAVOLTA, 2005). Epstein e Bloom (2006) reportaram o trabalho realizado por Stout e Hoagland (1939) com radiopotássio em plantas de salgueiro, os quais demonstraram que o principal caminho percorrido pelo K no caule até os órgãos de residência é via xilema (transporte a longa distância), contudo, também há ocorrência de rápido movimento lateral do nutriente via floema.

No floema, o K é o cátion mais abundante (VIRO; HAEDER, 1971; MENGEL, 1985), apresentando concentrações entre 60 a 110 mmol L^{-1} (MARTIN, 1989) e desempenha papel importante no transporte de compostos orgânicos como o malato às raízes, que posteriormente, é reciclado via xilema juntamente com nitrato (NO_3^-) até a parte aérea (BEN-ZIONI; VAADIA; LIPS, 1971; MENGEL, 1985; MARSCHNER, 2012). Adicionalmente, este nutriente move-se rapidamente para outros órgãos como folhas novas, frutos e grãos, os quais atuam como forte dreno fisiológico (MENGEL, 1985; MARTIN, 1989; MALAVOLTA, 2005), justificando o fato deste elemento ser facilmente redistribuído de um órgão de residência para outro órgão em formação. Ademais, a movimentação de nutrientes em plantas pode ser mais bem elucidada com auxílio de elementos traçadores que não estão inicialmente presentes no substrato (EPSTEIN; BLOMM, 2006), como por exemplo, o Rb, o qual apresenta mobilidade na planta similar à verificada para o K (SCHENK; FELLER, 1990; SHINONAGA et al., 1999).

A redistribuição do K pela planta é evidenciada visualmente a partir dos sintomas de deficiência do elemento em folhas velhas, caracterizados inicialmente por clorose e posterior necrose das margens foliares, associada à diminuição do teor do nutriente neste órgão (BERINGER; NOTHDURFT, 1985; MALAVOLTA, 2005). Os sintomas típicos de

deficiência de K são decorrentes, por exemplo, da redução na síntese protéica, provocando acúmulo de aminoácidos como ornitina, citrulina e arginina, os quais são precursores da poliamina putrescina, composto nitrogenado tóxico às plantas (BASSO; SMITH, 1974; CROCOMO; BASSO, 1974; FARIDUDDIN, et al. 2013). Richards e Coleman (1952) foram os primeiros autores a demonstrar o acúmulo de putrescina em folhas de cevada deficientes em K. Vasconcellos et al. (1977) verificaram, em folhas de milho deficientes em K, valores de putrescina muito superiores aos observados em folhas de milho com suprimento adequado do elemento. Adicionalmente, alguns autores utilizam o acúmulo de putrescina nos tecidos foliares de plantas de *Betula* spp. como parâmetro para definir o nível crítico de K (SARJALA; KAUNISTO, 2002).

Quanto à demanda nutricional, o acúmulo e a distribuição da quantidade acumulada de K na planta, é possível encontrar valores muito variáveis, principalmente em função do estádio de desenvolvimento da planta, dos genótipos utilizados e do nível de suprimento de K empregado (HANWAY; JOHNSON, 1985). No início do desenvolvimento das plantas, os tecidos formados na fase vegetativa como raízes, caules e folhas, demandam maior quantidade de K oriundo do substrato (MENGEL, 1985; HANWAY; JOHNSON, 1985; MALAVOLTA, 2005). Já na fase reprodutiva, na qual ocorre a formação dos frutos, boa parte do K acumulado nestes tecidos é proveniente do nutriente redistribuído a partir de órgãos de residência como as folhas (MENGEL, 1985; HANWAY; JOHNSON, 1985), uma vez que nesta fase, a atividade radicular e a absorção de nutrientes, de modo geral, são reduzidas.

Em plantas de soja, o acúmulo de K ocorre até o florescimento pleno, no estádio R2. Nestas plantas, o K acumulado na fase vegetativa é remobilizado para vagens e grãos, os quais são formados a partir da fase reprodutiva (HANWAY; JOHNSON, 1985). Contudo, cultivares de soja com tipo de crescimento indeterminado (TCI) são caracterizados por aumentar o porte da planta, bem como formar folhas novas durante parte do estádio reprodutivo, conferindo, portanto, modificações na relação fonte-dreno desse grupo de cultivares (OLIVEIRA JUNIOR et al., 2013).

Karlen, Hunt e Matheny (1982) reportaram variação da concentração de K em cultivares de soja em função do estádio de desenvolvimento das plantas. Concentrações de K nos limbos, nos pecíolos e nos caules reduziram, respectivamente, 44, 61 e 60 % do estádio V12 para o estádio R5. Resultados semelhantes foram verificados para a cultura do feijoeiro (BERTSCH et al., 2003), indicando a remobilização do K de tecidos de residência na fase vegetativa para tecidos em formação na fase reprodutiva.

Hanway e Johnson (1985) afirmam que quando o suprimento de K às plantas de soja é baixo, a remobilização do K de um órgão de residência para outro tecido em formação é maior e ocorre mais cedo, se comparado a plantas da mesma espécie submetidas a concentrações adequadas de K. Fagueria, Baligar e Edwards (1990) verificaram que a partir da quantidade total de K absorvida pela cultura do trigo, 2 %, 78 % e 20 % são armazenados, respectivamente nas raízes, parte aérea e grãos, ao passo que na cultura da soja, os valores, nas mesmas partes da planta, são de 8 %, 41 % e 51 %. Esses resultados sugerem que a cultura do trigo apresenta grande capacidade de reciclagem interna de K.

O acúmulo de K em grãos varia principalmente entre espécies de plantas. Dentre a quantidade absorvida de K para a produção de uma tonelada de grãos, Borkert et al. (2005) relataram que para a cultura da soja absorve-se 32 kg por tonelada de grãos, ao passo que para a cultura do milho e trigo, Malavolta (2005) sugere valores, respectivamente de 18,2 e 20,6 kg t^{-1} de grãos, e Castro e Oliveira (2005) indicam para a cultura do girassol o valor de 116 kg t^{-1}, embora a exportação de K por esta última cultura seja baixa (CASTRO; OLIVEIRA, 2005).

Graves et al. (1981) observaram variação genotípica em plantas de soja quanto a resposta à fertilização com K, na qual a aplicação de 56 kg ha^{-1} de K incrementou a produtividade dos cultivares McNair 600, Forrest e Essex, respectivamente, na ordem de 520, 740 e 1580 kg ha^{-1}, evidenciando ainda, possível variação genotípica na eficiência de utilização de K (EUtK).

A eficiência nutricional de K é coordenada pela eficiência de absorção de K (EAbK) e pela EUtK (WHITE, 2013), e é variável, principalmente, em função da disponibilidade de K no solo e pelos genótipos e espécies utilizados (RENGEL; DAMON, 2008; WHITE, 2013). Adicionalmente, Rengel e Damon (2008) sugerem que a eficiência de uso de K de um determinado genótipo está associada a diversos fatores como a capacidade de substituir K por outros cátions, a distribuição de K por meio de organelas que atuam na regulação do K no citoplasma, bem como maior remobilização de fotoassimilados para os grãos da planta.

Em recente revisão, White (2013) sugere que genótipos com maior eficiência em utilizar K devem apresentar, por exemplo, maior redistribuição do K presente nas raízes para a parte aérea, bem como maior remobilização do K de tecidos senescentes para outros tecidos em formação. Este autor conclui ainda, que a variação entre espécies e genótipos quanto a EUtK é importante para selecionar plantas altamente eficientes aliada a utilização de menor quantidade de fertilizantes potássicos.

Portanto, o estudo da movimentação do K e a conseqüente redistribuição para diferentes tecidos vegetais tornam-se importantes na seleção de genótipos eficientes em

utilizar este nutriente, possibilitando a utilização desses cultivares em regiões onde há maior ou menor disponibilidade de K no solo.

Objetivou-se com o presente estudo avaliar o acúmulo, a redistribuição e a eficiência de utilização de K por meio de cultivares de soja com tipo de crescimento determinado (TCD) e indeterminado (TCI).

3.2 Material e Métodos

O experimento foi desenvolvido em casa de vegetação localizada no Centro de Energia Nuclear na Agricultura, da Universidade de São Paulo, em Piracicaba – SP, no período de setembro de 2012 a janeiro de 2013. Foram utilizados quatro cultivares de soja, dentre os quais um cultivar TCD, TMG 1066 RR, e outros três cultivares TCI, NA 5909 RG, VMAX RR e BRS 360 RR.

As sementes foram colocadas para germinar em bandeja rasa com vermiculita, umedecida com solução de sulfato de cálcio ($CaSO_4$, 10^{-4} mol L^{-1}). Quando as plântulas atingiram cerca de 5 cm de altura, foram transferidas para bandeja plástica com capacidade de 40 L contendo solução nutritiva (HOAGLAND; ARNON, 1950), adaptada por Epstein e Bloom (2006), diluída a 1/5 da concentração usual, e com o pH próximo a 5,0 (período de adaptação). Após o terceiro dia do transplante das mudas, duas plantas de cada cultivar, no estádio V1, foram transferidas para vasos plásticos de 2,5 L contendo 2,0 L de solução nutritiva completa e então, iniciaram-se os tratamentos. Ademais, as plantas foram fixadas na região do colo com auxílio de espuma plástica, de modo que somente o sistema radicular entrasse em contato com a solução nutritiva.

Durante a realização do experimento, as soluções nutritivas, sob constante aeração, foram renovadas a cada 15 dias, completando-se o volume dos vasos com água deionizada, quando necessário. O valor de pH das soluções ficou em torno de 5,0 e a temperatura média da casa-de-vegetação durante o período experimental foi de 27ºC. Além disso, o controle de pragas e doenças foi realizado quando necessário, de modo a não comprometer a evolução das plantas.

As soluções nutritivas completas foram compostas por uma concentração baixa e outro adequada quanto ao suprimento de K (1,0 e 6,0 mmol L^{-1}) com adição de Rb à 20%, na forma de RbCl, objetivando traçar o K na planta. As aplicações de RbCl foram realizadas em cinco diferentes formas: na solução nutritiva no estádio V1 (SN-V1); na solução nutritiva no estádio V4 (SN-V4); nas folhas no estádio V4 (FOL-V4); na solução nutritiva no estádio R2 (SN-R2); nas folhas no estádio R2 (FOL-R2); A adição de RbCl nos tratamento com aplicação foliar foi realizada por meio de solução do elemento e aplicada com auxílio de pincel nas folhas aleatoriamente presentes nos terços inferiores, médios e superiores.

O delineamento experimental foi de blocos ao acaso, com duas concentrações de K/Rb, cinco tratamentos de Rb, quatro cultivares e três repetições, totalizando 120 unidades experimentais.

No período do florescimento, no estádio R2, foi realizada a coleta de folhas para análise de poliamina putrescina, segundo metodologia descrita por Flores e Galston (1982) e adaptada por Lima (1999). Além disso, durante o ciclo de desenvolvimento das plantas, as folhas senescentes foram armazenadas em sacos de papel devidamente identificados, de modo a evitar a perda de material vegetal.

Na ocasião da colheita, no estádio R8, as plantas foram divididas em raízes, caules e pecíolos, limbos, pericarpos e grãos, e armazenadas em sacos de papel devidamente identificados e colocados para secar em estufa a 65ºC, por período de 96 horas. Posteriormente, aferiu-se a massa seca e os tecidos vegetais foram processados em moinho tipo Wiley e submetido à digestão por via úmida em forno de micro-ondas (HNO_3 + H_2O_2) à 170ºC durante 40 minutos, segundo metodologia adaptada de AOAC (2000). Em seguida, os extratos foram utilizados para determinar a concentração de K e Rb nos tecidos vegetais, com o auxílio de equipamento de espectrometria de emissão óptica por plasma acoplado indutivamente (*Optima 8300 ICP-OES Spectrometer*).

A massa seca de grãos foi ajustada para 13 % de umidade, os acúmulos de K e Rb foram calculados por meio da multiplicação da massa seca pela concentração dos elementos em determinado tecido vegetal, a distribuição percentual de Rb foi obtida por meio do acúmulo de Rb em determinado órgão vegetal dividido pelo acúmulo total de Rb na planta, multiplicado por 100; o transporte à longa distância foi determinado em função do conteúdo de K na parte aérea dividido pelo conteúdo de K na planta, multiplicado por 100, e por fim, o EUtK foi obtido por meio da divisão entre a produção de massa seca de grãos e o acúmulo de K nos grãos (SIDDIQI; GLASS, 1981; YANG et al., 2010).

Procedeu-se a análise de variância e aplicação do teste de Tukey (*P*<0,05) para os dados obtidos entre cada concentração de K por meio do *software SAS - System for Windows 6.11* (SAS INSTITUTE, 1996), e na ocasião de interação significativa entre os fatores analisados (cultivares x tratamentos de Rb), a análise de desdobramento foi realizada por meio do *software* SANEST (Sistema de Análise Estatística) para *DOS* (ZONTA; MACHADO; SILVEIRA JUNIOR, 1982).

3.3 Resultados e Discussão

Houve interação significativa (*P<0,01*) entre os genótipos e os tratamentos de Rb para a variável produção de grãos em ambos as concentrações de K (Tabela 1).

Tabela 1 – Produção de grãos dos genótipos de soja com TCD e TCI, em função dos tratamentos de Rb e sob duas concentrações de K na solução nutritiva, baixa (1 mmol L^{-1}) e adequada (6 mmol L^{-1})

Cultivares	SN-V1	SN-V4	FOL-V4	SN-R2	FOL-R2	Média
	---------- Produção de grãos (g/vaso) na concentração baixa de K ----------					
TMG 1066 RR	18,25 abAB	15,65 aB	21,07 aA	18,05 aAB	19,64 aA	18,53 a
VMAX RR	21,77 aA	18,46 aA	19,91 aA	19,29 aA	20,72 aA	20,03 a
NA 5909 RG	16,89 bB	18,07 aAB	20,93 aA	16,95 aB	20,72 aAB	18,71 a
BRS 360 RR	20,11 abA	11,12 bC	11,53 bC	5,62 bD	15,79 bB	12,83 b
Média	19,25 A	15,82 B	18,36 A	14,98 B	19,22 A	17,52
	-------- Produção de grãos (g/vaso) na concentração adequada de K --------					
TMG 1066 RR	23,34 bAB	25,81 bA	22,72 aB	17,11 bC	13,86 cD	20,57 b
VMAX RR	28,07 aA	28,62 aA	24,37 aB	13,11 cD	21,56 aC	23,14 a
NA 5909 RG	23,75 bA	17,02 dC	17,21 bC	21,21 aAB	18,53 bBC	19,54 b
BRS 360 RR	26,98 aA	22,14 cB	15,86 bD	19,70 abBC	18,33 bCD	20,60 b
Média	25,53 A	23,4 B	20,04 C	17,78 D	18,07 D	20,96

Médias seguidas por letras distintas, minúscula entre os cultivares e maiúscula entre os tratamentos de Rb, diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade

Verificou-se para a concentração de baixo suprimento de K, na média dos cultivares, que o genótipo BRS 360 RR obteve produção de grãos 36, 31 e 30 % inferior comparado, respectivamente, com os cultivares VMAX RR, NA 5909 RG e TMG 1066 RR, evidenciando que este cultivar possivelmente possui baixa eficiência de utilização de K (EUtK), conforme resultados apresentados na Tabela 4. Por outro lado, sob adequada concentração externa de K,

o cultivar VMAX RR obteve maior produção de grãos em relação aos demais cultivares. Quanto as tratamentos de Rb sob fornecimento adequado de K, verificou-se comportamento de maior produção de grãos quando este traçador foi fornecido às plantas nos estádios iniciais de desenvolvimento (SN-V1 e SN-V4).

Os teores de putrescina foram influenciados pela interação entre os genótipos e as formas de fornecimento de Rb ($P<0,01$) em ambos as concentrações de K e são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Teores de putrescina no tecido foliar dos genótipos de soja com TCD e TCI, em função dos tratamentos de Rb e sob duas concentrações de K na solução nutritiva, baixa (1 mmol L^{-1}) e adequada (6 mmol L^{-1})

Cultivares	SN-V1	SN-V4	FOL-V4	SN-R2	FOL-R2	Média
	------ Putrescina (µg g^{-1} matéria fresca) na concentração baixa de K ------					
TMG 1066 RR	31,90 aB	36,89 aA	15,15 cD	27,64 aC	31,87 aB	28,69 a
VMAX RR	20,39 bA	17,09 bB	19,87 bA	12,86 cC	15,29 bBC	17,10 c
NA 5909 RG	17,70 cB	17,85 bB	22,38 aA	19,01 bB	16,74 bB	18,74 b
BRS 360 RR*	---	---	---	---	---	---
Média	23,33 A	23,94 A	19,13 C	19,84 BC	21,30 B	21,51
	---- Putrescina (µg g^{-1} matéria fresca) na concentração adequada de K ----					
TMG 1066 RR	20,46 aA	21,24 aA	16,18 cB	21,44 aA	21,21 aA	20,11 a
VMAX RR	19,04 bA	18,07 bAB	18,50 bAB	17,67 bB	16,31 bC	17,92 b
NA 5909 RG	18,42 bB	11,20 cD	21,95 aA	16,20 cC	11,11 cD	15,77 c
BRS 360 RR	9,45 cB	18,06 bA	6,02 dC	5,50 dC	9,89 dB	9,78 d
Média	16,84 A	17,14 A	15,66 B	15,20 BC	14,63 C	15,89

Médias seguidas por letras distintas, minúscula entre os cultivares e maiúscula entre os tratamentos de Rb, diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade

* Não determinado

O cultivar VMAX RR, sob condições de deficiência de K, apresentou, na média dos cultivares, menor teor de putrescina no tecido foliar (17,10 µg g^{-1} matéria fresca), valor este 10 e 68 % inferior ao verificado, respectivamente, para os cultivares NA 5909 RG e TMG 1066 RR, evidenciando maior capacidade do cultivar VMAX RR em desenvolver-se sob condições de estresse causado pela baixa concentração externa de K, podendo ainda estar associado a eficiência de utilização de K (WHITE, 2013). Por outro lado, sob adequada concentração de K na solução nutritiva, o teor de putrescina nos tecidos foliares dos cultivares seguiu a ordem: TMG 1066 RR > VMAX RR > NA 5909 RG > BRS 360 RR.

Quanto aos tratamentos de Rb, na média das formas de suprimento, verificou-se para ambas as concentrações de K, maior teor de putrescina nas folhas nos estádios iniciais de desenvolvimento das plantas que receberam o fornecimento do traçador na solução nutritiva (SN-V1 e SN-V4).

Em artigo de revisão, Fariduddin et al. (2013) sugerem que o acúmulo de putrescina está relacionado a fatores como variação genotípica e sua tolerância ou sensibilidade ao estresse, como por exemplo, a baixa disponibilidade de K, informações estas de suma importância as quais foram observadas no presente estudo.

Houve interação significativa (*P<0,01*) entre genótipos e tratamentos de Rb, nas duas concentrações de K, para as variáveis acúmulo de K, acúmulo de Rb e distribuição percentual de Rb em todas as partes das plantas (raízes, caules e pecíolos, folhas, pericarpos e grãos), sendo os resultados apresentados graficamente por meio das Figuras 1, 2 e 3.

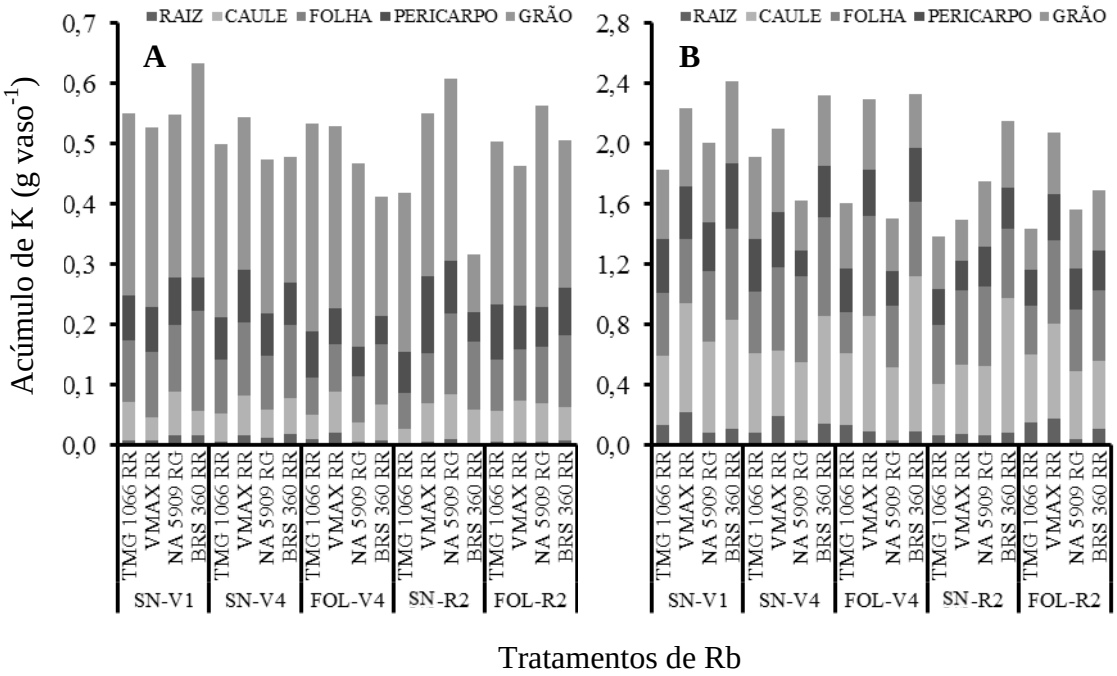

Figura 1 – Acúmulo de K nas partes dos genótipos de soja com TCD e TCI, em função dos tratamentos de Rb e sob duas concentrações de K na solução nutritiva, baixa (1 mmol L^{-1}) [A] e adequada (6 mmol L^{-1}) [B]

Verificou-se, sob condições de adequado suprimento de K, maior acúmulo do nutriente nos grãos para os genótipos de soja TCI VMAX RR e BRS 360 RR. Por outro lado, sob condições de limitada disponibilidade do nutriente, os genótipos TMG 1066 RR e NA 5909 RG obtiveram maior acúmulo de K nos grãos. A capacidade do genótipo em acumular

maior quantidade de nutrientes nos grãos pode indicar maior transporte a longa distância ou maior redistribuição (LAVRES JUNIOR, 2007). No presente estudo, foi verificado relação entre o transporte a longa distância do cultivar TMG 1066 RR, sob baixo fornecimento de K (Tabela 3), e o acúmulo de K nos grãos. Ainda, os tratamentos de Rb, isoladamente, tão pouco influenciaram o acúmulo de K nos tecidos vegetais.

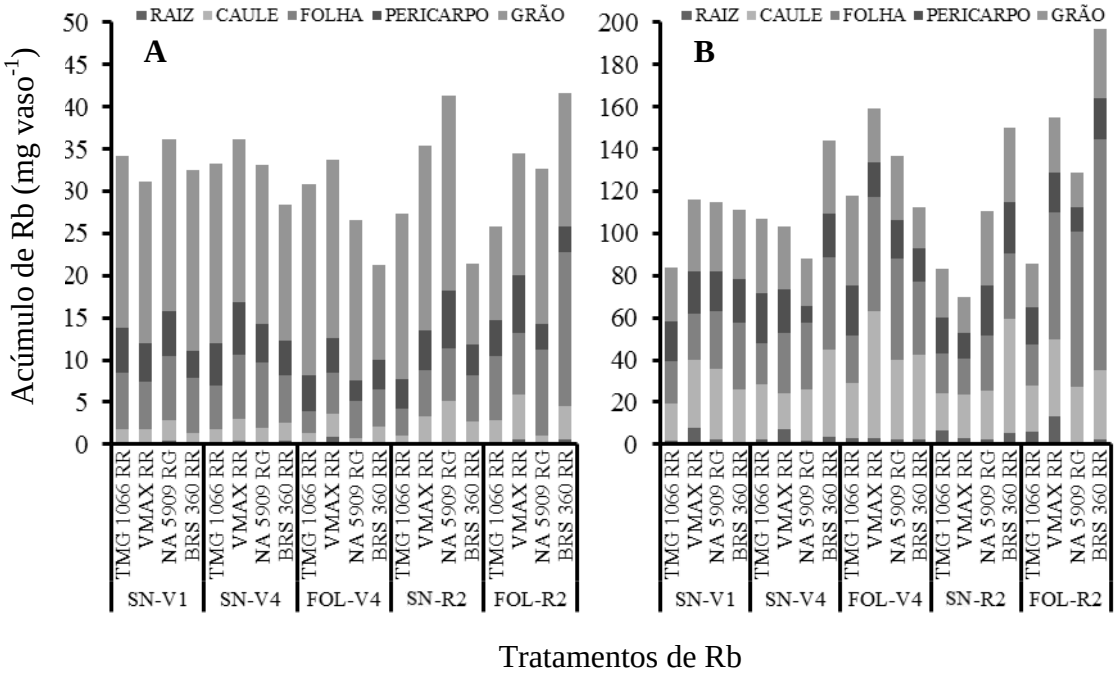

Figura 2 – Acúmulo de Rb nas partes dos genótipos de soja com TCD e TCI, em função dos tratamentos de Rb e sob duas concentrações de K na solução nutritiva, baixa (1 mmol L^{-1}) [A] e adequada (6 mmol L^{-1}) [B]

Ademais, quanto ao acúmulo de K nas partes das plantas, o comportamento do cultivar VMAX RR foi particular. Este cultivar obteve o maior acúmulo de K nas raízes (nas duas concentrações de K), nos caules e pecíolos (baixa concentração de K), nas folhas (adequada concentração de K), nos pericarpos (baixa concentração de K) e nos grãos (adequada concentração de K), conforme resultados apresentados na Figura 1A e 1B. O destaque deste cultivar em relação aos demais é enfatizado por apresentar maior produção de grãos (Tabela 1) e maior EUtK sob baixa disponibilidade de K na solução nutritiva (Tabela 4). Complementarmente, notou-se em condições de campo, na safra 2011/2012, a ocorrência de restrição hídrica e o melhor desenvolvimento deste cultivar (Figura 1, capítulo 4), o que pode ser evidenciado também pela elevada produção de raízes e presença de maior área superficial

e volume de raízes, resultados estes apresentados no capítulo 1. Semelhantemente, este cultivar destacou-se quanto ao acúmulo de Rb nas raízes, caules e pecíolos e grãos (Figura 2).

Quanto ao acúmulo e distribuição percentual de Rb nas partes das plantas, foi evidente o transporte de Rb das folhas para as raízes, via floema (Figuras 2 e 3), evidenciando a mobilidade deste elemento na planta. Resultados semelhantes foram verificados por Scott-Russell e Clarkson (1971), os quais relatam que o ^{42}K ou ^{86}Rb aplicado às folhas podem ser redistribuídos, via floema, para as raízes no período curto de 24 horas.

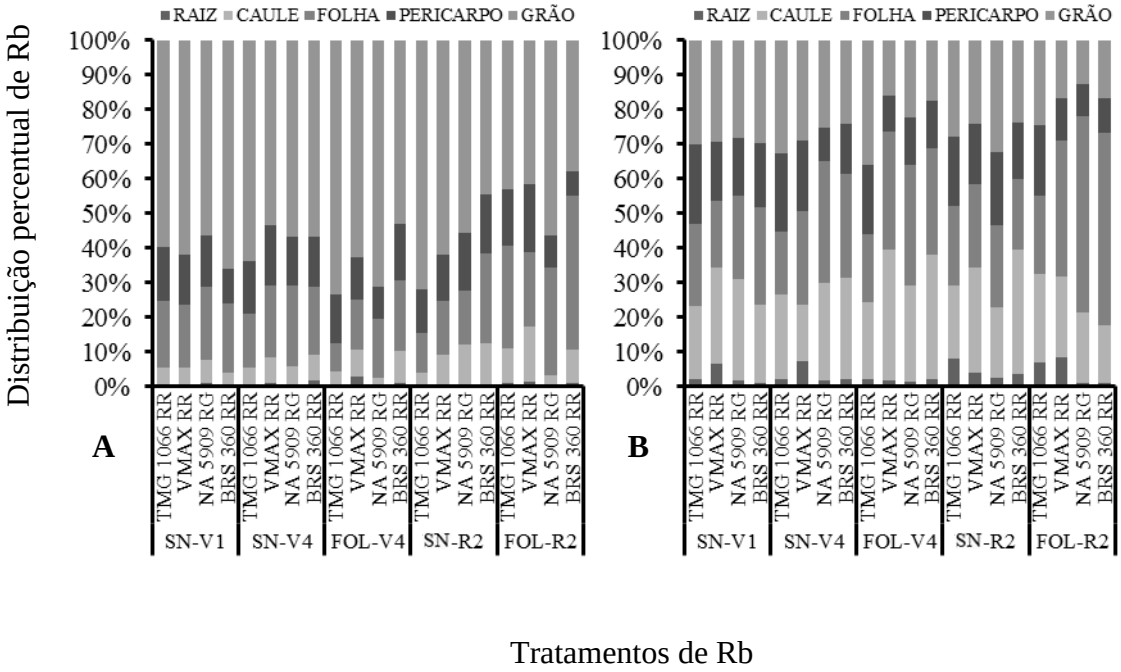

Figura 3 – Distribuição percentual de Rb nas partes dos genótipos de soja com TCD e TCI, em função dos tratamentos de Rb e sob duas concentrações de K na solução nutritiva, baixa (1 mmol L^{-1}) [A] e adequada (6 mmol L^{-1}) [B]

A distribuição percentual de Rb para os grãos sob condição de baixo fornecimento de K foi muito superior àquela verificada sob condição adequada de fornecimento do elemento, na ordem de 57 e 25 %, respectivamente para o baixo e para o adequado suprimento de K, conforme Figura 3A e 3B. Para o baixo suprimento de K, do total de Rb aplicado via foliar no estádio V4, 65% foram redistribuídos para os grãos, enquanto que para a concentração adequado de K, apenas 23 % foram remobilizados para este órgão. Lima Filho e Malavolta (2003), estudando plantas de café consideradas normais e deficientes em K, observaram que o acúmulo desse nutriente nos frutos, proveniente de reservas da própria planta, diminuiu

quando as plantas não mostravam deficiência de K, ou seja, o solo foi capaz de atender, em grande parte, a exigência de K pelos grãos.

O cultivar que apresentou maior capacidade de redistribuição de Rb para os grãos, em ambas as concentrações avaliadas, foi o TMG 1066 RR, na ordem de 62 e 30 % para a concentração baixa e adequada de fornecimento do nutriente (Figura 3A e 3B), respectivamente. Esta maior capacidade de redistribuição pode estar relacionada com o maior transporte a longa distância (Tabela 3) e acúmulo de K nos grãos (Figura 1). Wardle et al. (1983), utilizando Rb como traçador de K em experimento com plântulas de crisântemo, observaram a redistribuição do elemento de folhas velhas, originadas quando as plantas ainda se encontravam em meio de cultura (*in vitro*), para folhas novas, formadas após o transplantio para o solo.

A capacidade de redistribuição do total de Rb absorvido pelas raízes ou folhas para os grãos formados à aplicação do traçador, para os cultivares TMG 1066 RR, VMAX RR, NA 5909 RG e BRS 360 RR foi de, respectivamente, 62, 56, 59 e 51 % para a condição de baixo suprimento de K, enquanto que para a concentração adequada de K, os valores de redistribuição para os mesmos cultivares corresponderam a 30, 23, 24 e 22 %. Por outro lado, quanto aos tratamentos de Rb, na concentração baixa de K, 61, 58, 65, 58 e 45% do total de Rb remobilizado para os grãos foi por meio dos tratamentos de Rb, SN-V1, SN-V4, FLO-V4, SN-R2 e FLO-R2, respectivamente, ao passo que para a adequada concentração de K, estes valores corresponderam a 29, 28, 23, 27 e 18 % do total absorvido.

Quanto ao transporte a longa distância de K, foi verificado interação significativa ($P<0,01$) entre genótipos e tratamentos de Rb em cada concentração de K utilizada (Tabela 3). Sob condição de baixa concentração de K na solução nutritiva, o genótipo TMG 1066 RR obteve o maior valor (98,65 %), o qual pode estar associado a maior capacidade de redistribuição, conforme verificado na Figura 3. Para a concentração adequada de K, o genótipo NA 5909 RG obteve maior valor, seguido pelos cultivares BRS 360 RR, TMG 1066 RR e VMAX RR.

Tabela 3 – Transporte a longa distância dos genótipos de soja com TCD e TCI, em função dos tratamentos de Rb e sob duas concentrações de K na solução nutritiva, baixa (1 mmol L^{-1}) e adequada (6 mmol L^{-1})

Cultivares	SN-V1	SN-V4	FOL-V4	SN-R2	FOL-R2	Média
	------- Transporte a longa distância (%) na concentração baixa de K -------					
TMG 1066 RR	98,49 aAB	98,88 aA	97,97 bB	98,97 aA	98,94 aA	98,65 a
VMAX RR	98,58 aA	96,76 bcB	95,82 cC	98,70 aA	98,51 aA	97,67 c
NA 5909 RG	97,01 bB	97,38 bB	98,81 aA	98,42 aA	99,07 aA	98,14 b
BRS 360 RR	97,47 bC	96,18 cD	98,15 abBC	99,04 aA	98,44 aAB	97,86 bc
Média	97,87 B	97,30 C	97,69 BC	98,78 A	98,74 A	98,08
	----- Transporte a longa distância (%) na concentração adequada de K -----					
TMG 1066 RR	92,51 bB	95,49 bA	91,59 cB	95,35 abA	89,27 dC	92,84 c
VMAX RR	90,21 cB	90,83 dB	96,09 bA	94,98 bA	91,42 cB	92,71 c
NA 5909 RG	95,94 aC	97,76 aA	97,54 aAB	96,31 aBC	97,13 aABC	96,94 a
BRS 360 RR	95,58 aA	93,94 cB	95,95 bA	96,09 abA	93,71 bB	95,06 b
Média	93,56 C	94,51 B	95,29 A	95,68 A	92,88 D	94,38

Médias seguidas por letras distintas, minúscula entre os cultivares e maiúscula entre os tratamentos de Rb, diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade

Na Tabela 4, são apresentados os valores de EUtK, o qual segundo White (2013), está intimamente associado a capacidade de redistribuição de K presente em órgãos de residência para outros tecidos em formação, principalmente os grãos. Houve interação significativa ($P<0,01$) entre os genótipos e os tratamentos de Rb para as duas condições de suprimento de K. Para a baixa disponibilidade de K, o cultivar VMAX RR apresentou maior EUtK, ao passo que para a adequada disponibilidade de K, os cultivares TMG 1066 RR e VMAX RR obtiveram valores superiores de EUtK, quando comparado a aquele do o cultivar BRS 360 RR.

Portanto, evidencia-se que os cultivares TMG 1066 RR e VMAX RR possuem características as quais lhes conferem maior eficiência de produção e utilização de K. O cultivar VMAX RR possui elevada produção de grãos independente da disponibilidade externa de K, além de apresentar baixos teores foliares de putrescina sob condições de estresse nutricional por K, e ainda apresentar elevada EUtK e capacidade em acumular K nos tecidos. Por outro lado, o cultivar TMG 1066 RR possui elevada capacidade de acumular K nos grãos sob baixo fornecimento de K, além de apresentar maior transporte a longa distância sob condições de baixo suprimento de K e maior redistribuição de Rb de órgãos de residência para os grãos, os quais são considerados um dreno forte. Em contrapartida, o cultivar BRS

360 RR apresentou baixa capacidade de produção de grãos sob condições de deficiência de K e baixa EUtK (Tabela 4).

Tabela 4 – Eficiência de utilização de K (EUtK) dos genótipos de soja com TCD e TCI, em função dos tratamentos de Rb e sob duas concentrações de K na solução nutritiva, baixa (1 mmol L^{-1}) e adequada (6 mmol L^{-1})

Cultivares	SN-V1	SN-V4	FOL-V4	SN-R2	FOL-R2	Média
	---------- EUtK (g MS g K^{-1}) na concentração baixa de K ----------					
TMG 1066 RR	60 abAB	55 bB	61 aAB	68 abAB	72 bA	63 b
VMAX RR	73 aB	73 aB	66 aB	72 aB	90 aA	75 a
NA 5909 RG	63 abA	71 aA	69 aA	57 bA	62 bA	64 b
BRS 360 RR	57 bA	53 bA	58 aA	58 abA	65 bA	58 b
Média	63 B	63 B	64 B	64 B	72 A	65
	---------- EUtK (g MS g K^{-1}) na concentração adequada de K ----------					
TMG 1066 RR	51 aA	47 aA	53 aA	48 aA	51 abA	50 ab
VMAX RR	54 aA	51 aA	52 aA	49 aA	52 aA	52 a
NA 5909 RG	45 bA	51 aA	49 abA	49 aA	47 abA	48 bc
BRS 360 RR	49 abA	47 aA	44 bA	45 aA	46 bA	46 c
Média	50 A	49 A	49 A	48 A	49 A	49

Médias seguidas por letras distintas, minúscula entre os cultivares e maiúscula entre os tratamentos de Rb, diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade

3.4 Conclusões

O cultivar VMAX RR possui maior eficiência de utilização de K quando comparado aos demais cultivares estudados.

O cultivar VMAX RR possui elevada produção de grãos independente da disponibilidade de K, elevada EUtK, maior capacidade de acumular K nos tecidos, além de apresentar baixo teor de putrescina sob condição de deficiência de K, porém baixo transporte de K a longa distância.

O cultivar TMG 1066 RR possui elevada capacidade de acumular K nos grãos e elevado transporte de K a longa distância sob condições de baixo fornecimento de K, além de maior redistribuição de Rb de órgãos de residência para os grãos.

O cultivar BRS 360 RR apresenta baixa produção de grãos sob baixa disponibilidade de K e baixa EUtK.

Referências

BARBER, S. A. **Soil nutrient bioavailability**. A mechanistic approach. New York: Wiley-Interscience, 1984. 398p.

BASSO, L. C.; SMITH, T. Effect of mineral deficiency on amine formation in higher plants. **Phytochemistry**, Oxford, v.13, n.6, p.875-883, 1974.

BEN-ZIONI, A.; VAADIA, Y.; LIPS, S. H. Nitrate uptake by roots as regulated by nitrate reduction products of the shoot. **Physiologia Plantarum**, Copenhagen, v. 24, p. 288-290, 1971.

BERINGER, H.; F. NOTHDURFT. Effects of potassium on plant and cellular structures. In: MUNSON, R. D. (Ed.). **Potassium in agriculture**. Madison, WI: ASA-CSSA-SSSA, 1985. p.351-368.

BERTSCH, F.; HERNÁNDEZ, J. C.; ARGUEDAS, F.; ACOSTA, M. Curvas de absorción de nutrientes en dos variedades, Bribri y Sacapobres, de frijol común de grano rojo. **Agronomia Costarricense**, San José, v. 27, p. 75-81, 2004.

BIRSIN, M. A.; ADAK, M. S.; INAL, A.; AKSU, A.; GUNES, A. Mineral element distribution and accumulation patterns within two barley cultivar. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 33, n. 2, p. 267-284, 2010.

BORKERT, C. M.; CASTRO, C.; OLIVEIRA, F. A.; KLEPKER, D.; OLIVEIRA JUNIOR, A de. O potássio na cultura da soja. In: YAMADA, T.; ROBERTS, T. L. (Ed.). **Potássio na agricultura brasileira**. Piracicaba: POTAFÓS, 2005. p.671-713.

BURR, G. O.; TANIMOTO, T. Absorption and distribution of nutrients in sugar cane. Part II: Potassium. **Hawaiian Planters' Record**, Kunia, HI, v. 55, p. 11-13, 1955.

CASTRO, C.; OLIVEIRA, F. A. Nutrição e adubação do girassol. In: LEITE, R.M.V.B.C.; BRIGHENTI, A.M.; CASTRO, C. (Ed.). **Girassol no Brasil**. Londrina: Embrapa Soja, 2005. p.317-373.

COLLANDER, R. Selective absorption of cations by higher plants. **Plant Physiology**, Rockville, v. 16, p. 691-720, 1941.

CROCOMO, O. J.; BASSO, L. C. Accumulation of putrescina and related amino acids in potassium deficient *Sesamum*. **Phytochemistry**, Oxford, v.13, p.2659-2665, 1974.

DAINTY, J. Ion transport and electrical potentials in plants cells. **Annual Review of Plant Physiology**, Palo Alto, v.13, p. 379-402, 1962.

EPSTEIN, E.; BLOOM, A. J. **Nutrição mineral de plantas**: princípios e perspectivas. 2. ed. Londrina: Planta, 2006. 403 p.

EPSTEIN, E.; HAGEN, C. E.A kinetic study of the absorption of alkali cation by barley roots. **Plant Physiology**, Rockville, v. 27, p. 457-474, 1952.

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C.; EDWARDS, D. C. Soil-plant nutrient relationships at low pH stress. In: BALIGAR, V. C.; DUNCAN, R. R. (Ed.). **Crops as enhancers of nutrient use.** San Diego: Academic Press, 1990. p. 475-507.

FARIDUDDIN, Q.; VARSHNEY, P.; YUSUF, M.; AHMAD, A. Polyamines: potent modulators of plant responses to stress. **Journal of Plant Interactions**, Oxon, v. 8, n. 1, p. 1-16, 2013.

FLORES, H.E.; GALSTON.A.W. Analysis of polyamines in higher plants by high performance liquid chromatography. **Plant Physiology**, Rockville, v.69, p.701-706, 1982.

GRAVES, C.; McCUTCHEN, T.; FREELAND, R.; HATHCOCK, R. Soybean varieties respond to potassium. **Better Crops with Plant Food**, New York, v.66, n.3, p. 7-9, 1981.

HALEVY, A. H.; WITTWER, S. H. Foliar uptake and translocation of rubidium in bean plants as affected by root absorbed growth regulators. **Planta**, Berlin, v. 67, p. 375-383, 1965.

HANWAY, J. J.; JOHNSON, J. W. Potassium nutrition of soybeans. In: MUNSON, R. D. (Ed.). **Potassium in agriculture**. Madison, WI: ASA-CSSA-SSSA, 1985. p.753-764.

KARLEN, D. L.; HUNT, P. G.; MATHENY, T. A. Accumulation and distribution of K, Ca and Mg by selected determinate soybean cultivars growth with and without irrigation. **Agronomy Journal**, Madison, v.57, p. 325-328, 1982.

LAUCHLI, A.; EPSTEIN, E. Transport of potassium and rubidium in plant roots. **Plant Physiology**, Rockville, v. 45, p. 639-641, 1970.

LÄUCHLI, A.; PFLÜGER, R. Potassium transport through plant cell membranes and metabolic role of potassium in plants. In: INTERNATIONAL POTASH INSTITUTE. **Potassium research review and trends**. Bern: PPI, 1978. p.111-164.

LAVRES JUNIOR, J. **Influência genotípica na absorção, utilização e na toxidez de manganês na soja**. 2007. 88 p. Tese (Doutorado em Ciências) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

LIMA, G. P. P. **Marcadores bioquímicos de injúrias pelo frio e de maturação em bananas (*Musa acuminata* AAA Simm. & Shep. cv nanica)**. 2000. 103f. Tese (Livre – Docência em Bioquímica Vegetal) - Instituto de Biociências, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Botucatu, 2000.

LIMA FILHO, O. F.; MALAVOLTA, E. Studies on mineral nutrition of coffee plant (*Coffea arabica* L. cv. Catuaí Vermelho). LXIV. Remobilization and re-utilization of nitrogen and potassium by normal and deficient plants. **Brazilian Journal of Biology**, São Carlos, v. 63, n. 3, p. 481-490, 2003.

MALAVOLTA, E. Potássio – Absorção, transporte e redistribuição na planta. In: YAMADA, T.; ROBERTS, T. L. (Ed). **Potássio na agricultura brasileira**. Piracicaba: POTAFOS, 2005. p. 179-238.

MARSCHNER, P. (Ed.). **Marschner's mineral nutrition of higher plants**. 3. ed. San Diego: Academic Press, 2012. 651 p.

MARTIN, P. Long-distance transport and distribution of potassium in crop plants. In: COLLOQUIUM LOUVAIN-LA-NEUVE, 21., 1989, Bern. **Methods of K-research in plants**; proceedings…Bern: IPI, 2989. p.83-100.

MENGEL, K. Potassium movement within plant and its importance in assimilate transport. In: MUNSON, R. D. (Ed.). **Potassium in agriculture**. Madison, WI: ASA-CSSA-SSSA, 1985. p.397-411.

MENGEL, K.; KIRKBY, E. A. **Principles of plant nutrition**. 4. ed. Bern: International Potash Institute, 1987. 687 p.

MEURER, E. J. Potássio. In: FERNANDES, M. S. (Ed.). **Nutrição mineral de plantas**. Viçosa: SBCS, 2006. p.281-298.

OLIVEIRA JUNIOR, A de; CASTRO, C. de; OLIVEIRA, F. A. de; JORDÃO, L. T. Adubação potássica da soja: cuidados no balanço de nutrientes. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, n. 143, p.1-10, 2013.

RAIJ, B. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2011. 420 p.

RENGEL, Z.; DAMON, P. M. Crops and genotypes differ in efficiency of potassium uptake and use. **Physiologia Plantarum**, Copenhagen, v. 133, p. 624–636, 2008.

RICHARDKS, F. J.; COLEMAN, R.G. Occurrence of putrescine in potassium deficient barley. **Nature**, London, v. 170, n. 4324, p. 460, 1952.

SARJALA T.; KAUNISTO S. Potassium nutrition and free polyamines of *Betula pendula* Roth. And *Betula pubescens* Ehrh. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 238, p. 141149, 2002.

SCHENK, D.; FELLER, U. Rubidium export from individual leaves of maturing wheat. **Journal of Plant Physiology**, Stuttgart, v.137, p. 175-179, 1990.

SCOTT-RUSSELL, R.; CLARKSON, D. T. The uptake and distribution of potassium in crop plants. In: INTERNATIONAL POTASH INSTITUTE. **Potassium in biochemistry and physiology**. Bern, 1971.p. 79-92.

SHINONAGA, T.; PROHL, G.; MULLER, H.; AMBE, S. Experimentally determined mobility of trace elements in soybean plants. **The Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 225, p. 241-248, 1999.

SIDDIQI, M. Y.; GLASS, A. D. M. Utilization Index: A modified approach to the estimation and comparison of nutrient utilization efficiency in plants. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 4, p. 289–302, 1981.

STOUT, P. R.; HOAGLAND, D. R. Upward and lateral movement of salt in certain plants as indicated by radioactive isotopes of potassium, sodium and phosphorus absorbed by roots. **American Journal of Botany**, New York, v. 26, n. 5, p. 320-324, 1939.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Plant physiology**. 5. ed. Porto Alegre: Artmed, 2012. 954 p.

VAKHMISTROV, D. B.; ZAKHARIN, A. A. Localization of the receptor in the self-regulation system of potassium accumulation by sunflower plants in connection with the hypothesis of cell carriers. **Soviet Plant Physiology**, Washington, DC, v. 15, p. 495-500, 1968.

VASCONCELLOS, C. A.; FORTES, J. M.; FERNANDES, J.; SANTOS, Z. T.; BASSO, L. C.; MALAVOLTA, E. Ocorrência de putrescina em folhas de milho, Var. 'Piranão'deficientes em potássio. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 24, n. 31, p. 88-93, 1977.

VIRO, M.; HAEDER, H. E. The effect of the potassium status of tomato plants on the transport of organic compounds to the fruits. In: INTERNATIONAL POTASH INSTITUTE. **Potassium in biochemistry and physiology**. Bern, 1971.p.118-124.

WALLACE, A. Retranslocation of Rb^{86}, Cs^{37} and K to new leaf growth in bush beans. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 29, p. 184-188, 1968.

WARDLE, K.; DALSOU, V.; SIMPKINS, I.; SHORT, K. C. Redistribution of rubidium in plants of *Chrysantemum morifolium* Ram. cv. Snowd on derived from tissue cultures and transferred to soil. **Annals of Botany**, Oxford, v. 51, p. 261-264, 1983.

WHITE, P. J. Improving potassium acquisition and utilisation by crop plants. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, New York, v. 176, n.3, p. 305-316, 2013.

ZONTA, E. P.; MACHADO, A. A.; SILVEIRA JUNIOR, P. **Sistema de Análise Estatística – SANEST**. Registro no SEI nº066060. Pelotas: UFPEL, 1982.63p.

YANG, F.; WANG, G.; ZHANG, Z.; ENEJI, A. E.; DUAN, L.; LI, Z.: TIAN, X. Genotypic variations in potassium uptake and utilization in cotton. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v.34, n. 1, p. 83-97, 2010.

4. Nível crítico de potássio para cultivares de soja com tipo de crescimento indeterminado em Latossolo Vermelho distroférrico

Resumo - Estudos de calibração objetivando definir valores de nível crítico (NC) de potássio (K) no solo e na planta são fundamentais para a adequada interpretação dos resultados de análise de solo e folha. O objetivo deste trabalho foi calcular o NC de K no solo e na planta, para cultivares de soja com tipo de crescimento indeterminado (TCI). O estudo foi desenvolvido na Embrapa Soja, no período de setembro de 2010 a março de 2013, sob Latossolo Vermelho distroférrico cultivado em sistema de plantio direto. O delineamento experimental foi de blocos ao acaso com seis doses de K (0, 40, 80, 120, 160 e 200 kg ha^{-1}), com quatro repetições, na forma de cloreto de potássio (60% K_2O), aplicado à lanço na semeadura somente até a safra 2007/2008. Após esta safra, o fornecimento de K foi interrompido e o experimento foi desenvolvido sob o efeito residual das doses de K. Os cultivares de soja TCI utilizados foram VMAX RR e BRS 360 RR, além da cultura do trigo na safra de inverno. As parcelas foram constituídas pelas doses de K e os cultivares contidos na subparcela, com cinco linhas de soja para cada cultivar, totalizando 40 m^2. Para a adubação de base foi aplicado 40 kg ha^{-1} de P_2O_5, via superfosfato simples, para as safras de verão, e nas safras de inverno, foi aplicado 50 kg ha^{-1} de P_2O_5, via superfosfato simples e 20 kg ha^{-1} de N, via sulfato de amônia. Os teores de K trocável no solo foram obtidos por meio de amostragem de solo antes do início das safras de verão e posterior análise química com extrator Mehlich-1. Já os teores foliares de K foram obtidos por meio da amostragem de folha no período do florescimento pleno (R2), e os dados de produção relativa de grãos foram calculados por meio da produtividade de grãos obtida na colheita das plantas no estádio R8. A produtividade relativa de grãos de 90% foi definida como parâmetro para calcular o NC externo e interno de K. Foi verificado sintomas de deficiência de K nos dois cultivares avaliados, e estas desordens nutricionais foram mais pronunciadas para o cultivar BRS 360 RR no tratamento de 40 kg ha^{-1}, além do tratamento controle, a partir do início da formação de vagens e enchimento de grãos. O NC externo de K para o cultivar VMAX RR e BRS 360 RR foi de, respectivamente, 0,38 e 0,29 $cmol_c$ dm^{-3}, enquanto que o NC interno de K para os mesmos cultivares foi de 25,4 e 21,3 g kg^{-1}, respectivamente. Os valores de NC externo e interno obtidos neste estudo são superiores aos verificados na literatura para genótipos de soja com tipo de crescimento determinado (TCD).

Palavras-chave: Potássio trocável. Folha diagnóstico. Produção relativa de grãos.

Critical level of potassium for soybean cultivars with indeterminate growth type in Rhodic Hapludox

Abstract - Calibration studies aiming to define values of critical level (CL) of potassium (K) in soil and plant are essential for the proper interpretation of the results of soil and leaf analysis. The aim of this study was to calculate the soil and plant K-critical levels for soybean cultivars with indeterminate growth type (IGT). The study was conducted at the Embrapa Soja, from September 2010 to March 2013, under Rhodic Hapludox cultivated under no-tillage system. The experimental design was randomized blocks with six doses of K (0, 40, 80, 120, 160 and 200 kg ha^{-1}), with four replications, in the form of potassium chloride (60% K_2O) applied to the haul at sowing only until the 2007/2008 harvest. After this season, the K supply was stopped and the experiment was conducted under the residual effect of K doses. The cultivars used were VMAX RR and BRS 360 RR, plus the wheat crop in the winter season. The plots were made by the K doses and the cultivars contained in the subplot with five soybean lines for each cultivar, totaling 40 m^2. For fertilizer was applied 40 kg ha^{-1} P_2O_5 through simple superphosphate for summer crops and winter crops was applied 50 kg ha^{-1} of P_2O_5 through simple superphosphate and 20 kg ha^{-1} N through ammonium sulfate. The contents of exchangeable K in the soil were obtained by sampling of soil before the start of summer crops and subsequent chemical analysis with Mehlich-1 extractor. The foliar content of K were obtained by sampling leaf during the full flowering (R2) and data on grain yield were calculated using the grain yield obtained at harvest plants at the R8 phenological growth stage. The relative grain yield of 90% was defined as parameters to calculate the external and internal CL K. K deficiency symptoms in both cultivars evaluated was observed, and these nutritional disorders were more pronounced for the BRS 360 RR in the treatment of 40 kg ha-1, and the control treatment, from the beginning of pod formation and filling grains. The soil K-critical levels to the cultivars VMAX RR and BRS 360 RR were 0.38 and 0.29 cmolc dm^{-3}, respectively, while the plant tissue K-critical levels for the same cultivars were 25.4 and 21.3 g kg^{-1}, respectively. These values of soil and plant K-critical levels obtained in this study are higher than those in the literature for genotypes with indeterminate growth type (IGT).

Keywords: Exchangeable potassium. Diagnostic leaf. Relative grain yield.

4.1 Introdução

O potássio (K) é encontrado no solo em quantidades que variam de acordo como material de origem, composição mineralógica e grau de intemperismo, atingindo concentrações totais entre 0,3 a 30 g kg^{-1} de solo, as quais podem ser menores em solos ácidos como os encontrados em regiões tropicais (ERNANI; ALMEIDA; SANTOS, 2007).

No solo, as diferentes formas de K possuem dinâmica particular. O K presente na solução do solo é aquele ligado às cargas negativas dos argilominerais (K trocável) e está prontamente disponível às plantas, enquanto que o K contido nas camadas estruturais das argilas (K não-trocável) e aquele presente nas estruturas de minerais (K estrutural), embora encontram-se em equilíbrio com as demais formas desse nutriente, são liberados para a solução do solo de forma muito lenta (MELO et al., 2000; MELO et al., 2003; CURI; KAMPF; MARQUES, 2005; NACHTIGALL; RAIJ, 2005; RAIJ, 1991; RAIJ, 2011). No entanto, alguns estudos apontam que para determinadas classes de solo e genótipos de plantas, há possibilidade de liberação e utilização de K não-trocável quando observado que as quantidades extraídas de K pelas plantas são superiores às formas de K prontamente disponíveis no solo (RICHARDS; BATES; SHEPPARD, 1988; SILVA et al., 2000; CASTILHOS; MEURER, 2002; ANDRIST-RANGEL et al., 2007; GARCIA et al., 2008; KAMINSKI et al., 2010; SARKAR; CHATTOPADHYAY; SANYAL, 2013).

A disponibilidade de K para as plantas é influenciada por fatores relacionados ao solo, condições climáticas, espécies e genótipos vegetais. Como exemplos, a disponibilidade desse elemento às plantas pode ser influenciada pelo pH do solo e a interação com outros nutrientes como cálcio (Ca) e magnésio (Mg) (OLIVEIRA; CARMELLO; MASCARENHAS, 2001), uma vez que absorvido o K da solução do solo, a concentração desse nutriente é influenciada por processos de sorção e equilíbrio químico com outras bases trocáveis do solo (MEURER, 2010; RAIJ, 2011). Ainda, fatores como a atividade iônica, equilíbrio entre as diferentes formas de K no solo, capacidade de troca catiônica (CTC), poder tampão de K (PTK), mobilidade vertical do K no solo, morfologia radicular e o transporte do íon até as raízes, bem como a temperatura e a umidade do solo, também influenciam a disponibilidade de K para as plantas (ERNANI; ALMEIDA; SANTOS, 2007; RAIJ, 2011). Devido ao contato do K com as raízes ser intermediado principalmente pelo processo de difusão (BARBER, 1984; MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997), a absorção de K pode ser afetada ainda pelo grau de compactação e conteúdo de água no solo, uma vez que estes fatores influenciam no fluxo difusivo do íon (COSTA et al., 2009).

O influxo de K nas células das raízes ocorre num processo intermediado por proteínas localizadas na membrana plasmática e que podem ser do tipo carregadoras ou canais, sendo as primeiras mais seletivas para o elemento, atuando a baixas concentrações externas num sistema de alta afinidade (baixo K_m), enquanto os canais, menos específicos, em concentrações de K mais elevadas na solução externa, promovem a difusão facilitada num sistema de baixa afinidade (alto K_m) (LEONARD, 1985; MAATHUIS; SANDERS, 1997; MALAVOLTA, 2005; ROSOLEM, 2005; MEURER, 2006; EPSTEIN; BLOOM, 2006). Após absorvido, o K é facilmente transportado à longa distância via xilema e, devido à alta mobilidade intracelular, redistribui-se facilmente pelos vasos do floema, prioritariamente de órgãos mais velhos para órgãos mais novos (MEURER, 2006).

Dentre suas funções na planta, o K atua na síntese protéica, ativação enzimática, fotossíntese, transporte de fotoassimilados e regulação do potencial osmótico das células, exercendo papel importante na expansão celular, abertura e fechamento dos estômatos (EPSTEIN; BLOOM, 2006; MALAVOLTA, 2006; MARSCHNER, 1995). Por conseguinte, o K influencia tanto a produtividade quanto a qualidade de produtos agrícolas como a soja, o milho, o trigo e o algodão (PETTIGREW, 2008). Em grãos de soja, Yin e Vyn (2003) observaram efeito da fertilização com K na composição de ácidos graxos, enquanto Vyn et al. (2002) evidenciaram ainda um aumento na concentração de isoflavona em resposta à aplicação de K. Por outro lado, sintomas visuais de deficiência de K na soja iniciam-se com clorose seguido de necrose nas margens e pontas das folhas velhas (BERINGER; NOTHDURFT, 1985) além do aumento nos teores de putrescina (MALAVOLTA, 2006). Ainda, a baixa disponibilidade de K no solo pode causar diminuição gradativa da produção, safra após safra, porém sem os sintomas típicos de deficiência, ocorrendo a chamada “fome oculta”, ou seja, há redução da taxa de crescimento da planta com redução da produtividade da soja (BORKERT; SILVA; SFREDO, 1993b).

Em experimentos de calibração de nutrientes, os quais correlacionam o teor do nutriente contido no solo ou no tecido vegetal com a produção relativa de massa seca em determinado órgão vegetal, em função de diversos níveis de suprimento do elemento no solo, é possível obter o nível crítico (NC) do nutriente no solo (NC externo) ou na planta (NC interno), o qual é definido como o teor no solo ou na planta a partir do qual o aumento no fornecimento do nutriente representa baixo incremento em produtividade ou ainda, baixa eficiência econômica (SILVA; NOGUEIRA; GUIMARÃES, 2000; MALAVOLTA, 2006; CANTARUTTI et al., 2007; RAIJ, 2011). O NC de um determinado nutriente no solo ou na planta fornece informações relevantes quanto à exigência nutricional da planta e

probabilidade de resposta à adubação em diferentes condições edáficas. Adicionalmente, busca-se com a aplicação do nutriente elevar o teor no solo até o NC, e ao atingir este, a recomendação de adubação baseia-se somente na reposição das quantidades exportadas pelo produto colhido, fundamentando-se na "lei da restituição" (CANTARUTTI et al., 2007).

Para o K, a avaliação da disponibilidade no solo e a calibração do NC externo é realizada com base nos teores trocáveis (K na solução do solo + K trocável), por meio dos métodos como Mehlich-1, Mehlich-3, resina de troca iônica e NH_4OAc pH 7,0 (RAIJ, 1981; BORTOLON; GIANELLO; SCHLINDWEIN, 2010).

Na Região Sul do Brasil, mais especificamente nos Estados de Santa Catarina (SC) e Rio Grande do Sul (RS), o NC de K estabelecido pela Comissão de Fertilidade do Solo (CFS RS/SC) é variável em função das classes de CTC, com valores de 45, 60 e 90 mg dm^{-3} respectivamente para as CTCs de 0-5, 5-15 e >15 $cmol_c$ dm^{-3}, nas camadas de 0-0,10 m para o sistema de plantio direto e 0-0,20 m no sistema convencional (CFSRS/SC, 2004). Contudo, Brunetto et al. (2005), conduzindo experimentos de longa duração na região da Depressão Central do Estado do RS, cultivando soja, milho e sorgo em Argissolo sob sistema de plantio direito, obtiveram NC de 42 mg dm^{-3} de K (90% do rendimento relativo) para CTC entre 5-15 $cmol_c$ dm^{-3}, profundidade de 0-0,10 m e extração pelo método Mehlich-1, valor este muito abaixo do qual foi verificado pela CFSRS/SC (2004). Por outro lado, Schlindwein, Bortolon e Gianello (2011) encontraram, em experimentos conduzidos sob vários tipos de solo no Rio Grande do Sul, nas culturas da soja, milho e trigo, também em sistema de plantio direto, NC de K na profundidade de 0-0,10 m, mais elevados do que os recomendados pelo programa de adubação da CFSRS/SC, sendo 117,2; 116,1 e 102,5 mg kg^{-1} para os métodos Mehlich-1, Mehlich-3 e resina, respectivamente.

Vieira et al. (2013), em experimentos visando a determinação de critérios de calagem e teores críticos de P e K em Latossolos sob sistema de plantio direto, para um esquema de rotação de culturas representativo da região Centro-Sul do Paraná, envolvendo soja e milho no verão e aveia branca, trigo e cevada no inverno, obtiveram NC de K (90% do rendimento relativo) variáveis de acordo com as culturas e com as diferentes profundidades de amostragem, sendo, em geral, maiores para as culturas de inverno e para a profundidade de 0-0,10 m, ficando, nessa camada, em 0,40 e 0,20 $cmol_c$ dm^{-3} para as culturas de inverno e de verão, respectivamente, e na profundidade de 0-0,20 m, entre 0,30 e 0,16 $cmol_c$ dm^{-3} para as culturas de inverno e verão, respectivamente. Ademais, os autores atribuíram os maiores valores de NC na profundidade de 0-0,10 m ao acúmulo de nutrientes nas camadas mais superficiais do solo, inerente ao sistema de plantio direto.

Muzilli, Lantmann e Tornero (1979), realizando experimentos objetivando a identificação de classes de resposta aos teores de P e K avaliados por meio de análise do solo (Mehlich-1) com a cultura do trigo na década de 1970 no Estado do Paraná, evidenciaram para o K, com base na produção relativa de grãos, as classes de teor "muito baixo" (<75% produção relativa), "baixo" (75-90% produção relativa), "médio" (90-100% produção relativa) e "alto" (100% produção relativa), respectivamente para <0,12 $cmol_c$ dm^{-3}; 0,12-0,30 $cmol_c$ dm^{-3}; 0,31-0,55 $cmol_c$ dm^{-3} e >0,55 $cmol_c$ dm^{-3}. Neste mesmo trabalho, as respostas à adubação potássica no trigo foram positivas apenas nas duas primeiras classes, sendo predominantemente negativas nas duas últimas, indicando NC para o nutriente a partir de 0,31 $cmol_c$ dm^{-3} (90% da produção relativa de grãos), valor muito próximo aos encontrados por Vieira et al. (2013).

Na cultura do feijoeiro, Villa, Fernandes e Faquin (2004) observaram em experimento realizado em casa de vegetação utilizando solos de várzea (Gleissolo Melânico, Gleissolo Háplico, Neossolo Flúvico e Organossolo Méssico) da região de Lavras, Minas Gerais (MG), que o NC de K (90% produção relativa), extraído pelos métodos Mehlich-1 e resina na camada de 0-0,20 m, variou pouco entre os solos, ao passo que, quando expresso em termos de saturação de K (%) na CTC, o mesmo variou de 4,1 até 8,7% de acordo com o solo estudado. De forma semelhante, Cabbau et al. (2004), utilizando os mesmos solos de várzea na cultura do arroz inundado, encontraram NC de K (90% produção relativa), extraído por Mehlich-1, variando entre 4,0 a 8,1% de saturação de K na CTC pH 7,0. Enquanto isso, para um Argissolo na Indonésia, Dierolf e Yost (2000) obtiveram NC de K para o arroz na camada de 0-0,15 m, por extração com NH_4OAc 1 mol L^{-1}, de 0,14 $cmol_c$ kg^{-1}.

Além da profundidade da camada amostrada, das espécies e genótipos de plantas, dos métodos de extração utilizados e dos diferentes tipos de solo (RAIJ, 1991), outros fatores podem influenciar o NC de K no solo, como observado por Barbagelata e Mallarino (2012), em que o NC de K extraído por NH_4OAc na camada de 0-0,15 m, nas culturas do milho e soja, foi maior quando as amostras do solo foram secas em estufa (35-40º C) em comparação àquelas com umidade do campo e, ainda, estas últimas amostras apresentaram melhor correlação entre as concentrações de K e a produtividade de grãos.

Small Junior e Ohlorogge (1973), Trani, Hiroce e Bataglia (1983) e Borkert, Silva e Sfredo (1993b) definiram valores críticos de K no tecido foliar da soja, respectivamente de 17,1; 17,0 e 17,1 g kg^{-1}. Borkert, Silva e Sfredo (1993b) estabeleceram ainda, por meio de genótipos de soja TCD, faixa de suficiência de K no tecido foliar entre 17,1 a 25 g kg^{-1}.

Para a cultura do milho, Martinez, Carvalho e Souza (1999) sugeriram a faixa entre 17,5 e 22,5 g kg^{-1} como sendo suficiente para condições adequadas de nutrição foliar de K.

Villa, Fernandes e Faquin (2004) e Cabbau et al. (2004), obtiveram teores críticos em folha diagnóstico no período do florescimento variando em função do tipo de solo. Para a cultura do feijoeiro, o NC de K encontrado pelos primeiros autores foi de 1,79; 3,05; 1,68 e 1,46 g kg^{-1}, respectivamente para o Organossolo Mésico, Gleissolo Melânico, Gleissolo Háplico e Neossolo Flúvico, enquanto que para o arroz inundado, o NC foliar encontrado pelos segundos autores foi de 9,6; 11,1; 10,2 e 11,5 g kg^{-1}, para o Neossolo Flúvico, Gleissolo Háplico, Gleissolo Melânico e Organossolo Mésico, respectivamente. Por outro lado, na cultura do café, observam-se valores superiores aos encontrados no feijoeiro e arroz inundado, como os propostos por Silva, Nogueira e Guimarães (2000), de 17,4 g kg^{-1}, e Malavolta (1993), entre 19 e 24 g kg^{-1}.

Na cultura da soja no Brasil, os trabalhos visando a determinação de NC de K externo e interno, bem como a elaboração de tabelas e faixas de interpretação de nutrientes foram realizados baseando-se em resultados obtidos por meio de genótipos com tipo de crescimento determinado (TCD), como aqueles desenvolvidos por Souza (1984) no Cerrado e Borkert, Sfredo e Silva (1993) no Estado do Paraná. Contudo, nos últimos anos, com o aumento da área plantada com soja TCI, tem-se verificado que este grupo de cultivares possui comportamento nutricional diferente ao verificado no grupo de cultivares TCD (OLIVEIRA JUNIOR et al., 2013). A partir disso, torna-se fundamental o estudo de curvas de calibração e novas definições nos valores críticos de K para cultivares de soja TCI, a fim de melhor entendimento dos resultados de análise de solo e tecido vegetal em áreas cultivadas com este grupo de cultivares, bem como otimizar o manejo da adubação potássica nesta cultura.

O objetivo deste trabalho foi estabelecer o NC de K no solo e no tecido foliar para cultivares de soja TCI em Latossolo Vermelho distroférrico.

4.2 Material e Métodos

O estudo foi desenvolvido em condições de campo na Fazenda Experimental da Embrapa Soja, em Londrina, PR, no período de outubro de 2010 a março de 2013. A área experimental está localizada a 630 metros de altitude, o clima da região é apresentado como Cfa (subtropical úmido), segundo classificação de Köppen, e de acordo com o monitoramento do Instituto Agronômico do Paraná - IAPAR (2013), os dados climáticos do município entre

os anos de 1976 a 2012 apontam para uma temperatura média anual de 21,1ºC, umidade relativa do ar média de 70,4% e precipitação anual de 1600 mm distribuídos em 121 dias.

O experimento teve início no ano de 1989, em Latossolo Vermelho distroférrico (EMBRAPA, 2013), de textura muito argilosa (760 g kg^{-1} de argila), sob sistema de plantio direto. O resultado da análise química das amostras de solo nas camadas de 0-0,20 e 0,20-0,40 m, as quais foram coletadas em setembro de 2010, está contido na Tabela 1 e Tabela 2.

Tabela 1 - Resultado da análise química de macronutrientes e acidez nas amostras de solo coletadas nas camadas de 0-0,20 e 0,20-0,40 m em setembro de 2010

Prof. (m)	pH	Al^{3+}	$H^{+}+Al^{3+}$	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^{+}	P	S	C
	H_2O	…..……..		$cmol_c\ dm^{-3}$	…….....…..		$mg\ dm^{-3}$	$mg\ dm^{-3}$	$g\ dm^{-3}$
0-0,20	4,8	0,1	5,8	3,8	1,5	0,46	14,5	15,0	15,2
0,20-0,40	4,7	0,2	6,0	3,5	1,2	0,38	10,7	22,0	9,8

Ca, Mg, Al – extraídos com KCl 1mol L^{-1}. P e K – extraído com Mehlich-1. H+Al – método SMP. S – método Fosfato Monocálcico. C – método Walkley & Black

Tabela 2 - Resultado da análise química de micronutrientes nas amostras de solo coletadas nas camadas de 0-0,20 e 0,20-0,40 m em setembro de 2010

Prof. (m)	Fe	Zn	Cu	Mn	B
	…….....		$mg\ dm^{-3}$	…….……	
0-0,20	65,1	6,2	16,1	107,9	0,36
0,20-0,40	69,2	5,6	16,4	105,6	0,32

Fe, Zn, Cu, Mn – extraídos com Mehlich-1. B – extraído com Cloreto de Bário a quente

Os dados climáticos referentes à precipitação pluviométrica acumulada (mm) e temperatura média do ar (ºC) por decênios, ao longo das safras de verão, são apresentados na Figura 1.

O delineamento experimental foi de blocos ao acaso com seis doses de K (0, 40, 80, 120, 160 e 200 kg ha^{-1} de K_2O), com quatro repetições, na forma de cloreto de potássio (60% K_2O), aplicado a lanço no momento da semeadura somente até a safra 2007/2008. Após esta safra, o fornecimento de K foi interrompido e o experimento foi desenvolvido sob o efeito residual das doses de K.

O esquema de rotação de culturas utilizado durante o período de avaliação do presente estudo foi o cultivo de soja na safra de verão por meio dos genótipos VMAX RR e BRS 360 RR, ambos pertencente ao grupo de maturação 6.2, e na safra de inverno, cultivou-se trigo (*Triticum aestivum*) por meio do material BRS 208. As parcelas foram constituídas pelas doses de K e os cultivares contidos na subparcela, com cinco linhas de soja para cada cultivar, espaçadas a 0,50 m com 8 metros de comprimento cada linha, totalizando 40 m^2, e com área

útil, por sua vez, composta por três linhas de soja para cada cultivar e 6 metros de comprimento por linha, totalizando 9 m^2.

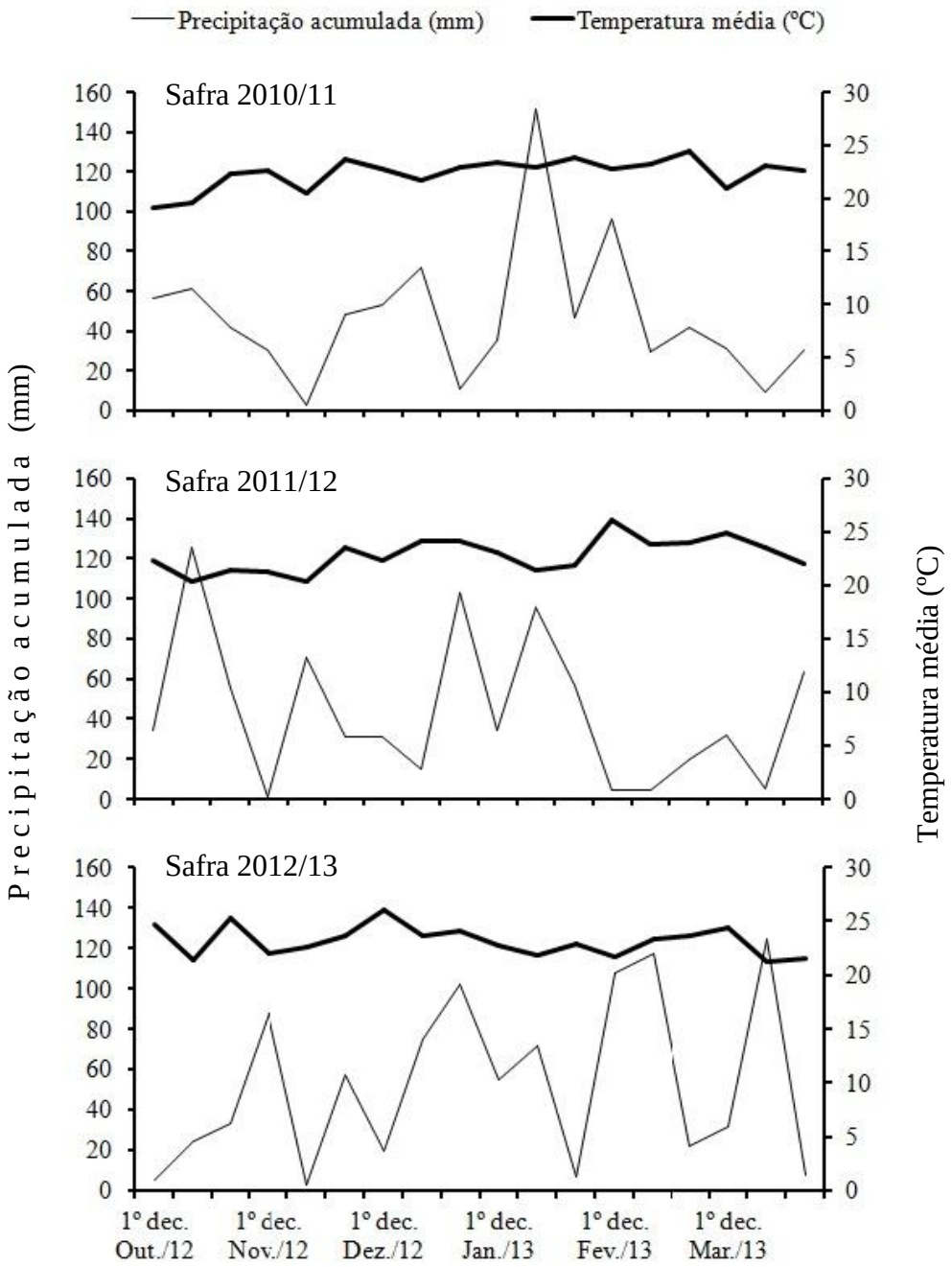

Figura 1 - Dados climáticos referentes às três safras em que o estudo foi desenvolvido

Semearam-se 15 sementes de soja por metro linear, as quais foram tratadas com fungicidas do grupo carboxanilida (carboxina) e dimetilditiocarbamato (tiram) na dose de 2,5 mL kg^{-1} sementes, inseticida do grupo pirazol (fipronil) na dose de 2 mL kg^{-1} sementes, além da inoculação das sementes por bactérias do gênero *Bradyrhizobium* e aplicação de

2 g ha^{-1} de cobalto (Co) e 20 g ha^{-1} de molibdênio (Mo). A adubação de base foi realizada simultaneamente à semeadura, a lanço, por meio da aplicação de 40 kg ha^{-1} de P_2O_5, via superfosfato simples, para as safras de verão, e nas safras de inverno, foram aplicados 50 kg ha^{-1} de P_2O_5, via superfosfato simples e 20 kg ha^{-1} de N, via sulfato de amônia. Adicionalmente, antes do plantio da soja na safra 2010/2011 foi aplicado 1,0 t ha^{-1} de calcário (PRNT 100%). Durante o desenvolvimento do experimento, o controle de pragas e doenças foi realizado quando necessário, de modo a não comprometer a evolução da lavoura e a produtividade.

Os teores de K no solo foram determinados por meio de coletas de amostras de solo nas profundidades de 0-0,20 e 0,20-0,40 m, sendo duas amostragens simples na linha de plantio e outras três na entrelinha, totalizando uma amostra composta por parcela. Posteriormente, as amostras de solo foram secas em estufa de circulação de ar forçada a 50ºC por 72 horas, e em seguida, foram moídas, peneiradas e analisadas em laboratório por meio do extrator Mehlich-1 e a leitura dos extratos realizada com auxílio de fotômetro de chama (SILVA, 2009).

Na ocasião do florescimento pleno das plantas, estádio R2, foram coletadas 15 folhas utilizadas para diagnose por parcela, identificadas como sendo o terceiro trifólio completamente desenvolvido a partir do ápice da haste principal, os quais foram devidamente identificados, armazenados em sacos de papel e secados em estufa de circulação de ar forçada a 65ºC, por período de 96 horas. Posteriormente, o tecido vegetal foi processado em moinho tipo Wiley e submetido à digestão por via úmida em forno de micro-ondas (HNO_3 + H_2O_2) à 170ºC, durante 40 minutos, segundo metodologia adaptada de AOAC (2000). Em seguida, os extratos foram utilizados para determinar a concentração de K nos tecidos, com o auxílio de equipamento de espectrometria de emissão óptica por plasma acoplado indutivamente (Optima 8300 ICP-OES Spectrometer).

Os grãos foram colhidos no ponto de colheita, representado pelo estádio R8, por meio do corte e trilha das plantas contidas na área útil de cada parcela. Em seguida, foi determinada a massa de grãos das parcelas e os valores corrigidos para 13% de umidade e a produtividade ajustada para kg ha^{-1}.

Os NCs foram definidos como sendo os valores dos teores de K no solo e na planta que representassem 90% da produção relativa máxima de grãos, e calculados por meio de regressão com o auxílio do *software Sigma Plot® v.10*. Para o NC externo, o qual correlacionou o teor de K trocável no solo com a produção relativa de grãos, utilizou-se dados das safras 2011/2012 e 2012/2013, e para o NC interno, em que foi correlacionado o teor de K

nas folhas utilizadas para diagnose com a produção relativa de grãos, os dados utilizados foram somente das safras 2010/2011 e 2012/2013.

4.3 Resultados e Discussão

As produtividades de soja obtidas a partir dos cultivares estudados variaram de acordo com a safra. Para o cultivar VMAX RR, a produtividade mínima e máxima foi de 2188 e 4205 kg ha^{-1}, 1481 e 3284 kg ha^{-1}, 1502 e 4287 kg ha^{-1}, ao passo que para o cultivar BRS 360 RR, foi de 2143 e 3478 kg ha^{-1}, 1615 e 3486 kg ha^{-1}, 1397 e 4168 kg ha^{-1}, respectivamente para as safras 2010/2011, 2011/2012 e 2012/2013.

O modelo de regressão que melhor ajustou-se aos dados experimentais obtidos para realização dos cálculos de NC externo e NC interno foi o polinomial inverso de primeira ordem ($P<0,01$), por meio da equação y = y0 + (a/x) c, em que "y" corresponde a produção relativa de grãos e "x" ao teor de K no solo (NC externo) e ao teor de K nas folhas diagnóstico (NC interno).

O NC de K no solo foi maior para o cultivar VMAX RR, quando comparado ao cultivar BRS 360 RR, respectivamente 0,38 e 0,29 $cmol_c$ dm^{-3} (Figura 2), sugerindo que o primeiro cultivar possui maior exigência em K em relação ao segundo. Esses valores diferem daquele encontrado nas recomendações de interpretação de análise de solo e folha para a cultura da soja no Estado do Paraná (PR), para solos com teor de argila acima de 40%, no qual o NC externo sugerido é de 0,20 $cmol_c$ dm^{-3} (BORKERT; SFREDO; SILVA, 1993a; EMBRAPA, 2011).

Semelhantemente, o NC externo estabelecido para os genótipos TCI neste trabalho está acima daquele verificado por Scherer (1998), o qual utilizou o cultivar de soja Bragg, com TCD, em experimento de longa duração (12 anos) sob Latossolo Húmico no Estado de Santa Catarina. Este autor obteve 90% da produção relativa de soja com teor de K no solo na ordem de 0,16 $cmol_c$ dm^{-3}. Em Latossolos e Argissolos localizados no Paraguai, cultivados sob sistema de plantio direto (SPD) envolvendo a rotação de culturas com soja, milho e trigo, Wendling et al. (2008) encontraram NC de K no solo (Mehlich-1), na camada de 0-0,10 m, de 0,19 $cmol_c$ dm^{-3}, enquanto Schlindwein, Bortolon e Gianello (2011), também cultivando soja, milho e trigo, em solos sob SPD no RS, obtiveram valores de 0,30 $cmol_c$ dm^{-3} de K pelo método Mehlich-1 na profundidade de 0-0,10 m. Considerando-se que no SPD há tendência de acúmulo de nutrientes como fósforo (P) e K nas camadas superficiais do solo (SCHLINDWEIN; ANGHINONI, 2000), os valores de NC externos encontrados por esses

autores são relativamente inferiores aos observados no presente trabalho, no qual uma maior profundidade de amostragem foi utilizada (0-0,20 m).

Para outros métodos de determinação de K trocável no solo, como o acetato de amônio (NH_4OAc) à 1 mol L^{-1} em solos do Estado de Kentucky, EUA, foram encontrados valores de NC externo de 0,21 $cmol_c$ dm^{-3} (GROVE et al., 1987) e 0,27 $cmol_c$ dm^{-3} (PEASLEE et al., 1985), para profundidade de amostragem de 0,15 a 0,18 m, respectivamente. Slaton et al. (2010), utilizando o extrator Mehlich-3 para profundidade de amostragem de 0,10 m em solos do Estado de Arkansas, EUA, obtiveram valor de NC externo de K de 0,29 $cmol_c$ dm^{-3}, o qual é relativamente maior se comparado aqueles comumente encontrados para o extrator acetato de amônio (NH_4OAc) à 1 mol L^{-1}. Apesar desses dois métodos apresentarem correlação significativa entre si, e mesmo extraindo quantidades similares de K (BEEGLE; ORAVEC, 1990), o valor mais elevado para NC externo de K encontrado com extrator Mehlich-3 é atribuído, principalmente, à estratificação do nutriente em função da menor profundidade de amostragem em relação aos trabalhos realizados com o NH_4OAc à 1 mol L^{-1} (BEEGLE; ORAVEC, 1990).

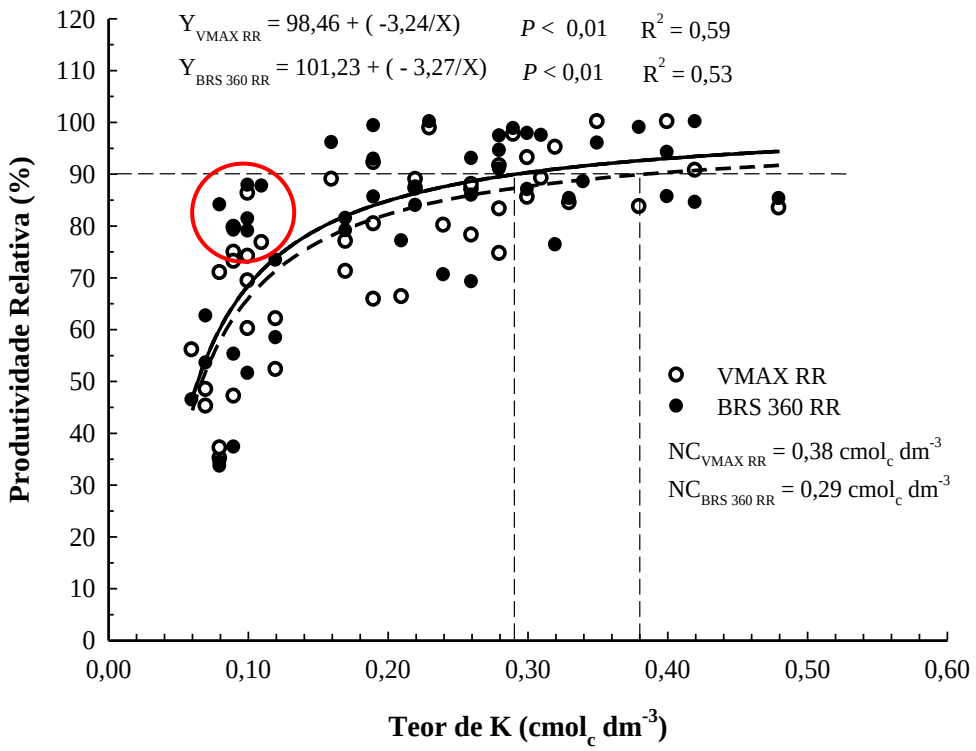

Figura 2 - Produtividade relativa de grãos de soja em função do teor de K trocável no solo e respectivos valores críticos de K externos para os cultivares de soja com TCI, VMAX RR (○) e BRS 360 RR (●). Média das safras 2011/2012 e 2012/2013

Observando a Figura 2, nota-se que embora os NCs externos de K para os dois cultivares estudados são superiores aos valores encontrados em diversos trabalhos, ao atingir cerca de 77 a 88% da produção relativa máxima de grãos, o teor de K trocável no solo representa apenas 0,08 a 0,10 $cmol_c$ dm^{-3} (Figura 2, círculo vermelho), implicando na possibilidade de contribuição do K não-trocável nessas parcelas. Fernandes et al. (2003) relatam que a cultura da soja apresenta grande capacidade de utilização do K não-trocável, variando em função do genótipo e diminuindo à medida que o K é fornecido via adubação.

Semelhante ao verificado para o NC externo de K, o NC interno de K obtido pelo genótipo VMAX RR foi 19% superior ao encontrado para o genótipo BRS 360 RR, com valores de 25,4 e 21,3 g kg^{-1}, respectivamente (Figura 3). Esses valores são superiores ao sugerido para interpretação de análise foliar de soja TCD, uma vez que o NC interno de K que representa 90% da produção relativa é sugerido como 17 g kg^{-1} (BORKERT; SILVA; SFREDO, 1993b; EMBRAPA, 2011).

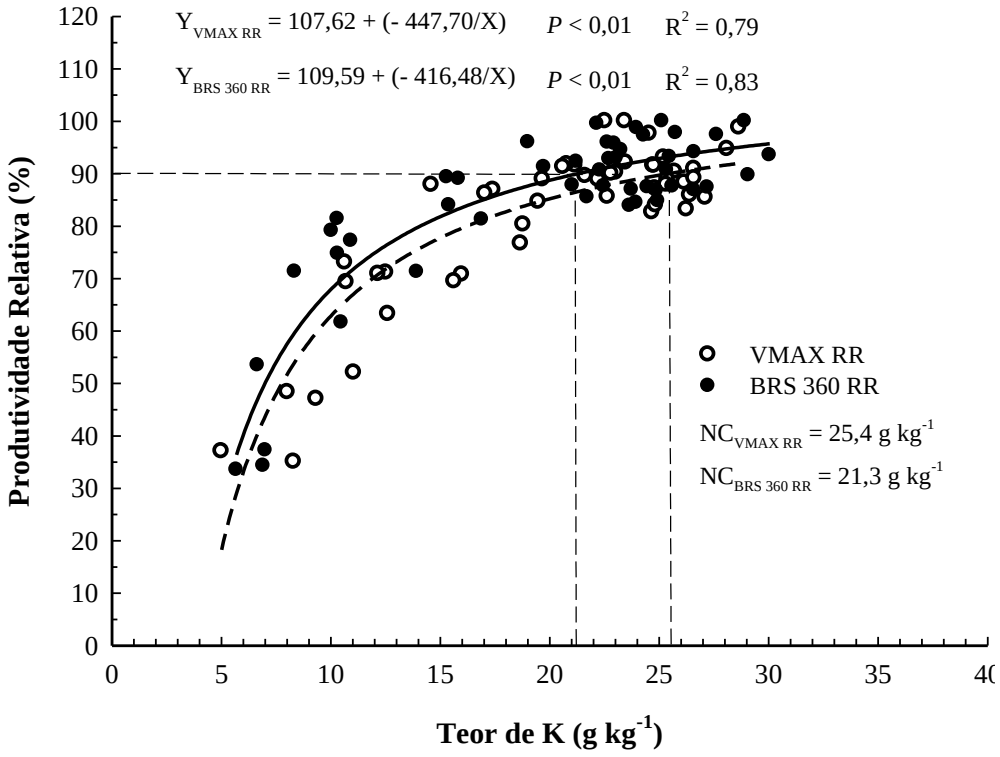

Figura 3 - Produtividade relativa de grãos de soja em função do teor de K foliar e respectivos valores críticos de K internos para os cultivares de soja com TCI, VMAX RR (○) e BRS 360 RR (●). Média das safras 2010/2011 e 2012/2013

Slaton et al. (2010) relataram que cultivares TCD e TCI apresentam diferenças no NC de K nas folhas quando amostradas no mesmo estádio de desenvolvimento (R1-R2) e que,

para os genótipos com TCI, houve uma correlação mais baixa entre a concentração de K nas folhas e a produtividade relativa se comparado aos genótipos com TCD e, dessa forma, é possível que para um diagnóstico mais apurado da nutrição potássica para soja TCI, seja necessário definir novos parâmetros quanto ao estádio para amostragem das folhas.

Scherer (1998), utilizando dados de quatro safras, dentre as doze em que o experimento foi desenvolvido, obteve NC de K foliar de 14 g kg^{-1} no estádio de florescimento (R1), valor este inferior aos obtidos pelos cultivares TCI neste estudo. Os resultados deste autor mostram ainda que a produção relativa máxima (100%) foi obtida com teor foliar de 19 g kg^{-1}, valor este inferior a aqueles encontrados para os dois cultivares utilizados neste estudo.

No Estado de Iowa, nos Estados Unidos da América, Clover e Mallarino (2013) conduzindo experimento em vinte locais e duas safras, alternando as culturas de soja e milho em sistema de plantio convencional, obtiveram valores de NC de K nas folhas de soja, amostradas no estádio R2, de 17,6 e 20 g kg^{-1}, com ajuste linear e quadrático dos dados, respectivamente. Outros estudos acerca de NC de K foliar na soja, realizados nos EUA na década de 70, evidenciaram valores de 17,1 a 20 g kg^{-1} entre os estádios de início do florescimento e início da formação de vagens (SMALL; OHLROGGE, 1973; PLANK, 1979; SARTAIN; FORBES; USHERWOOD, 1979). Por outro lado, na província de Ontario, Canadá, Yin e Vyn (2004) encontraram, para máxima produtividade da soja, uma concentração crítica de K de 25,9 g kg^{-1} em sistema de plantio direto, mais que o dobro daquela recomendada para a região (OMFARA, 1997).

Os valores de NC para K contidos nas tabelas atuais de interpretação de análise de solo e folha foram obtidos por meio da elaboração de curvas de calibração utilizando dados de experimentos avaliados durante diversas safras cultivadas com soja de TCD (BORKERT; SFREDO; SILVA, 1993a; 1993b). Contudo, os resultados obtidos neste presente estudo sugerem que genótipos com TCI, pelo fato de apresentarem valores superiores de NC externo e interno em comparação aos dos cultivares com TCD, provavelmente possuem maior exigência quanto ao K, havendo, portanto, a necessidade de revisão da recomendação de adubação potássica para soja TCI.

Verificaram-se sintomas de deficiência de K nos dois cultivares de soja TCI estudados (Figura 4). Comumente, a deficiência de K foi mais pronunciada no tratamento que recebia somente 40 kg ha^{-1} de K_2O, além do tratamento controle, e os sintomas de ausência do elemento surgiram no início da formação de vagens e enchimento de grãos, correspondente aos estádios R3-R5, primeiramente para o cultivar BRS 360 RR (Figura 4A). Embora este cultivar, nas condições experimentais deste estudo, apresentar NC externo menor que o

cultivar VMAX RR, ou seja, ser menos exigente quanto à demanda por K, o cultivar BRS 360 RR apresentava maior quantidade de vagens formadas, sugerindo maior ação dos processos de redistribuição do K presente nas folhas para os grãos.

Ademais, constatou-se o surgimento de deficiência de K em folhas novas (Figura 4B e 4C), fato este que também pode estar relacionado à relação fonte-dreno por cultivares de soja TCI, que por sua vez, têm a capacidade de formar, simultaneamente, folhas novas, flores, vagens e encher grãos, favorecendo a redistribuição do K destinado a formação de folhas novas para o enchimento de grãos – como estratégia de perpetuação da espécie (OLIVEIRA JUNIOR et al., 2013). Esta observação abre caminho para novas investigações mais aprofundadas quanto à fisiologia e à nutrição mineral de soja com TCI.

Figura 4 - Sintomas de deficiência de K mais pronunciados no cultivar BRS 360 RR (A), cultivado com a dose de 40 kg ha^{-1} de K_2O, apresentando os mesmos sintomas de deficiência de K em folhas novas em contraste com os tratamentos com as doses de 160 kg ha^{-1} (B) e 200 kg ha^{-1} (C) de K_2O

4.4 Conclusões

O NC externo e interno de K para os cultivares com TCI utilizados neste estudo é superior àqueles verificados para cultivares com TCD.

Há maior exigência de K por genótipos de soja com TCI, sugerindo a necessidade de revisão e adaptação dos parâmetros utilizados para interpretação da análise de solo e folhas.

Há necessidade de revisão da recomendação de adubação potássica para soja TCI.

Referências

ANDRIST-RANGEL, Y.; EDWARDS, A. C.; HILLIER, S.; OBORN, I. Long-term K dynamics in organic and conventional mixed cropping systems as related to management and soil properties. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 122, p. 413–426, 2007.

ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMIST - AOAC. **Official methods of analysis**. Official Method 999.10.Washington, DC: AOAC International, 2000.

BARBAGELATA, P. A.; MALLARINO, A. P. Field correlation of potassium soil test methods based on dried and field-moist soil samples for corn and soybean. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 77, p. 318–327, 2012.

BARBER, S. A. **Soil nutrient bioavailability**: a mechanistic approach. New York: John Wiley & Sons, 1984. 398 p.

BEEGLE, D. B.; ORAVEC, T. C. Comparison of field calibrations for Mehlich-3 P and K with Bray–Kurtz P1 and ammonium acetate K for corn. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 21, p. 1025–1036, 1990.

BERINGER, H.; NOTHDURFT, F. Effects of potassium on plant and cellular structures. In: Munson, R. D. (Ed.). **Potassium in agriculture**. Madison: ASA-CSSA-SSSA, 1985. p. 351-368.

BORKERT, C. M.; SFREDO, G. J.; SILVA, D. N. Calibração de potássio trocável para soja em Latossolo Roxo distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 17, p. 223-226, 1993a.

BORKERT, C. M.; SILVA, D. N.; SFREDO, G. J. Calibração de potássio nas folhas de soja em Latossolo Roxo distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 17, p. 227-230, 1993b.

BORTOLON, L.; GIANELLO, C.; SCHLINDWEIN, J. A. Disponibilidade de potássio para as plantas em solos do sul do Brasil estimada por métodos multielementares. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, p. 1753-1761, 2010.

BRUNETTO, G.; GATIBONI, L. C.; SANTOS, D. R.; SAGGIN, A.; KAMINSKI, J. Nível crítico e resposta das culturas ao potássio em um Argissolo sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, p. 565-571, 2005.

CABBAU, A. R.; FAQUIN, V.; FERNANDES, L. A.; ANDRADE, A. T.; SOBRINHO, R. R. L. Resposta e níveis críticos de potássio para o arroz cultivado em solos de várzea inundados. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 28, n. 1, p. 75-86, 2004.

CANTARUTTI, R. B.; BARROS, N. F.; PRIETO, H. E.; NOVAIS, R. F. Avaliação da fertilidade do solo e recomendação de fertilizantes. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: SBCS, 2007. p. 759-850.

CASTILHOS, R. M. V.; MEURER, E. J. Suprimento de potássio de solos do Rio Grande do Sul para arroz irrigado por alagamento. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, p. 977-982, 2002.

CLOVER, M. W.; MALLARINO, A. P. Corn and soybean tissue potassium content responses to potassium fertilization and relationship with grain yield. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 77, p. 630–642, 2013.

COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO - CFSRS/SC. **Manual de adubação e de calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. 10. ed. Porto Alegre: SBCS - Núcleo Regional Sul; UFRGS, 2004. 394 p.

COSTA, J. P. V; BARROS, N. F.; BASTOS, A. L.; ALBUQUERQUE, A. W. Fluxo difusivo de potássio em solos sob diferentes níveis de umidade e de compactação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.13, n.1, p.56–62, 2009.

CURI, N.; KAMPF, N.; MARQUES, J. J. Mineralogia e formas de potássio em solos brasileiros. In: YAMADA, T.; ROBERTS, T. L. (Ed.). **Potássio na agricultura brasileira**. Piracicaba: POTAFOS, 2005. p. 71-92.

DIEROLF, T. S.; YOST, R. S. Stover and potassium management in an upland rice-soybean rotation on an Indonesian Ultisol. **Agronomy Journal**, Madison, v. 92, p. 106–114, 2000.

EMBRAPA. **Tecnologias de produção de soja –** região central do Brasil 2012 e 2013. Londrina: Embrapa Soja, 2011. 261 p. (Sistemas de Produção, 15).

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306 p.

EPSTEIN, E.; BLOOM, A. J. **Nutrição mineral de plantas**: princípios e perspectivas. 2. ed. Londrina: Planta, 2006. 403 p.

ERNANI, P. R.; ALMEIDA, J. A.; SANTOS, F. C. Potássio. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: SBCS, 2007. p. 552-594.

FERNANDES, D. M.; ROSSETO, C. A. V.; ISHIMURA, I.; ROSOLEM, C. A. Nutrição da soja e formas de potássio no solo em função de cultivares e adubação potássica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 17, p. 405-410, 1993.

GARCIA, R. A.; CRUSCIOL, C. A. C.; CALONEGO, J. C.; ROSOLEM, C. A. Potassium cycling in a corn-brachiaria cropping system. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 28, p. 579–585, 2008.

GROVE, J. H.; THOM, W.O.; MURDOCK, L.W.; HERBECK, J.H. Soybean response to available potassium in three silt loam soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 51, p. 1231–1238, 1987.

INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ - IAPAR. **Sistema de monitoramento agroclimático do Paraná**. Londrina, 2012. Disponível em:http://www.iapar.br/arquivos/Image/monitoramento/Medias_Historicas/Londrina.htm. Acesso em: 26 nov. 2013.

KAMINSKI, J.; MOTERLE, D. F.; RHEINHEIMER, D. S.; GATIBONI, L. C.; BRUNETTO, G. Potassium availability in a hapludulf soil under long term fertilization. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, p. 783-791, 2010.

LEONARD, R. T. Absorption of potassium into root cells. In: Munson, R. D. (Ed.). **Potassium in agriculture**. Madison: ASA-CSSA-SSSA, 1985. p. 327-335.

MAATHUIS, F. J. M.; SANDERS, D. Regulation of K+ absorption in plant root cells by external K+: interplay of different plasma membrane K^+ transporters. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 48, p. 451-458. 1997.

MALAVOLTA, E. **Nutrição mineral e adubação do cafeeiro**: colheitas econômicas máximas. São Paulo: Ceres, 1993.210 p.

MALAVOLTA, E. Potássio – Absorção, transporte e redistribuição na planta. In: YAMADA, T.; ROBERTS, T. L. (Ed). **Potássio na agricultura brasileira**. Piracicaba: POTAFOS, 2005. p. 179-238.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas.** São Paulo: Agronômica Ceres, 2006. 638 p.

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

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2. ed. London: Academic Press, 1995. 889 p.

MELO, V. F.; NOVAIS, R. F.; FONTES, M. P. F.; SCHAEFER, C. E. G. R. Potássio e magnésio em minerais das frações areia e silte de diferentes solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, p. 269-284, 2000.

MELO, V. F.; CORRÊA, G. F.; MASCHIO, P. A.; RIBEIRO, A. N.; LIMA, V. C. Importância das espécies minerais no potássio total da fração argila de solos do Triângulo Mineiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**,Viçosa, v. 27, p. 807-819, 2003.

MEURER, E. J. **Fundamentos de química do solo**. 4. ed. Porto Alegre: Evangraf, 2010. 266p.

MEURER, E. J. Potássio. In: FERNANDES, M. S. (Ed.). **Nutrição mineral de plantas**. Viçosa: SBCS, 2006.p.281-298.

MUZILLI, O.; LANTMANN, A. F.; TORNERO, M. T. Respostas do trigo a fósforo e potássio como base de interpretação das análises de solo para adubação da cultura no estado do Paraná. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 3, p. 93-96, 1979.

NACHTIGALL, G. R.; RAIJ, B. Análise e interpretação do potássio no solo. In: YAMADA, T.; ROBERTS, T. L. (Ed.). **Potássio na agricultura brasileira**. Piracicaba: POTAFOS, 2005. p.93-118.

OLIVEIRA, F. A.; CARMELLO, Q. A. C.; MASCARENHAS, H. A. A. Disponibilidade de potássio e suas relações com cálcio e magnésio em soja cultivada em casa-de-vegetação. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.58, n.2, p.329-335, 2001.

ONTARIO MINISTRY OF AGRICULTURE, FOOD, AND RURAL AFFAIRS - OMFARA. **Field crop recommendations 1997–1998**. Guelph, 1997.296 p.

PETTIGREW, W. T. Potassium influences on yield and quality production for maize, wheat, soybean and cotton. **Physiologia Plantarum**, Copenhagen, v. 133, p. 670–681, 2008.

PLANK, O. C. **Plant analysis handbook for Georgia**. Athens: University of Georgia, Cooperative Extension Service, 1979. 735 p.

PEASLEE, D. E.; HICKS, B. F.; EGLI, D. B. Soil test levels of potassium, yields, and seed size in soybean cultivars. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 16, p. 899–907, 1985.

RAIJ, B. **Avaliação da fertilidade do solo**. Piracicaba: Instituto da Potassa & Fosfato, 1981. 142p.

RAIJ, B. **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba: Ceres,1991. 343p.

RAIJ, B. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2011. 420 p.

RICHARDS, J. E.; BATES, T. E.; SHEPPARD, S. C. Studies on the potassium-supplying capacities of Southern Ontario soils. I - Field and greenhouse experiments. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 68, p. 183-197, 1988.

ROSOLEM, C. A. Interação do potássio com outros íons. In: YAMADA, T.; ROBERTS, T. L. (Ed.). In: SIMPÓSIO SOBRE POTÁSSIO NA AGRICULTURA BRASILEIRA, 2005, Piracicaba, SP. **Anais…**Piracicaba: FEALQ, 2005. p. 239-260.

SARKAR, G. K.; CHATTOPADHYAY, A. P.; SANYAL, S. K. Release pattern of non-exchangeable potassium reserves in Alfisols, Inceptisols and Entisols of West Bengal, India. **Geoderma**, Amsterdam, v. 207–208, p. 8–14, 2013.

SARTAIN, J. B.; FORBES, R. B.; USHERWOOD, N. R. Yield response of soybeans to P and K fertilization as correlated with soil extractable and tissue nutrient levels. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 10, p. 1219–1232, 1979.

SCHERER, E. E. Níveis críticos de potássio para a soja em Latossolo Húmico de Santa Catarina. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, p. 57-62, 1998.

SCHLINDWEIN, J. A.; ANGHINONI, I. Variabilidade vertical de fósforo e potássio disponíveis e profundidade de amostragem do solo no sistema plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 30, p. 611-617, 2000.

SCHLINDWEIN, J. A.; BORTOLON, L.; GIANELLO, C. Calibração de métodos de extração de potássio em solos cultivados sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, p. 1669-1677, 2011.

SILVA, E. B.; NOGUEIRA, F. D.; GUIMARÃES, P. T. G. Níveis críticos de potássio no solo e nas folhas do cafeeiro. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 22, n. 4, p. 1095-1100, 2000.

SILVA, F. C. (Org.). **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2. ed. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2009. 627 p.

SILVA, I. R.; FURTINI NETO, A. E.; FERNANDES, L. A.; CURI, N.; VALE, F. R. Formas, relação quantidade/intensidade e biodisponibilidade de potássio em diferentes Latossolos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 35, p. 2065-2073, 2000.

SLATON, N. A.; GOLDEN, B. R.; DELONG, R. E.; MOZAFFARI, M. Correlation and calibration of soil potassium availability with soybean yield and trifoliolate potassium. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 74, p. 1642–1651, 2010.

SMALL, H. G.; OHLROGGE, A. J. Plant analysis as an aid in fertilizing soybeans and peanuts. In: WALSH, L. M.; BEATON, J.D. (Ed.). **Soil testing and plant analysis**. Madison, WI: SSSA, 1973. p. 315–327.

SOUZA, D. M. G. **Calagem e adubação da soja nos cerrados**. Planaltina: EMBRAPA, CPAC, 1984. 9p. (Comunicado Técnico, 38).

VIEIRA, R. C. B.; BAYER, C.; FONTOURA, S. M. V.; ANGHINONI, I.; ERNANI, P. R.; MORAES, R. P. Critérios de calagem e teores críticos de fósforo e potássio em Latossolos sob plantio direto no Centro-Sul do Paraná. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, p. 188-198, 2013.

VILLA, M. R.; FERNANDES, L. A.; FAQUIN, V. Formas de potássio em solos de várzea e sua disponibilidade para o feijoeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 649-658, 2004.

VYN, T. J.; YIN, X.; BRUULSEMA, T. W.; JACKSON, C. J. C.; RAJCAN, I.; BROUDER, S. M. Potassium fertilization effects on isoflavona concentrations in soybean [*Glycine max* (L.) Merr.]. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Easton, v.50, p. 3501–3506, 2002.

WENDLING, A.; ELTZ, F. L. F.; CUBILLA, M. M.; AMADO, T. J. C.; MIELNICZUK, J. Recomendação de adubação potássica para trigo, milho e soja sob sistema plantio direto no Paraguai. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 1929-1939, 2008.

YIN, X.; VYN, T. J. Potassium placement effects on yield and seed composition of no-till soybean seed in alternate row widths. **Agronomy Journal**, Madison, v. 95, p. 126–132, 2003.

YIN, X.; VYN, T. J. Critical leaf potassium concentrations for yield and seed quality of conservation-till soybean. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 68, p. 1626–1634, 2004.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os genótipos utilizados neste estudo apresentam comumente baixa afinidade dos carregadores de K (elevados valores de K_m) em ambas as condições de suprimento do nutriente, uma vez que esses genótipos foram obtidos por meio do melhoramento genético em condições ideais de desenvolvimento, evidenciando que para obterem produtividades elevadas a campo, é necessário o fornecimento constante de K seja pelas reservas presentes no solo ou pela adição de fertilizantes potássicos, o que também é enfatizado pelos valores dos influxos máximos de Rb ($V_{máx}$) apresentados pelos genótipos.

Não foram verificadas no presente estudo diferenças quanto à eficiência de absorção e utilização de K entre cultivares TCD e TCI, uma vez que os cultivares TMG 1066 RR (TCD) e VMAX RR (TCI), os quais pertencem a grupos distintos, obtiveram maiores performances quanto à eficiência de produção e utilização de K (Rb) quando comparados aos demais cultivares, bem como poucas diferenças quanto aos atributos morfológicos do sistema radicular (volume, comprimento, superfície de raízes) tanto em condições de baixo fornecimento de K, quanto naquela de adequado suprimento. Contudo, os valores críticos internos e externos de K para genótipos de soja TCI são superiores aos verificados na literatura para genótipos de soja TCD, os quais demonstram maiores exigências nutricionais em K para a obtenção de elevados rendimentos de produção de grãos.