Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”

Época da aplicação de potássio no sistema de produção soja – milho segunda
safra

Bruno Cocco Lago

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em
Ciências. Área de concentração: Fitotecnia

Piracicaba
2018

Bruno Cocco Lago
Engenheiro Agrônomo

Época da aplicação de potássio no sistema de produção soja – milho segunda safra
versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **JOSÉ LAÉRCIO FAVARIN**

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em
Ciências. Área de concentração: Fitotecnia

Piracicaba
2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP

Lago, Bruno Cocco

Época da aplicação de potássio no sistema de produção soja – milho segunda safra / Bruno Cocco Lago. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2018.

64 p.

Tese (Doutorado) - - USP / Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”.

1. Antecipação de potássio 2. Parcelamento de potássio 3. Recuperação de potássio do fertilizante 3. Acúmulo de potássio 4. Acúmulo de magnésio. I. Título

AGRADECIMENTOS

A presente tese de doutorado recebeu colaborações de muitas pessoas, por isso irei agradecer por meio das instituições destas pessoas.

Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” muito obrigado por me receber e acolher desde o mestrado. Descrever alegrias, amizades e ensinamentos que me proporcionou durante estes anos não cabem aqui.

Agradeço o amparo financeiro e estrutural recebido das agências: CNPq, pela bolsa de estudos processo nº 142209-2014/7; FAPESP, na infraestrutura do Laboratório Multiusuário em Produção Vegetal; CAPES, pela bolsa de PDSE processo nº 88881.135696/2016-01; e Fundação Agrisus, pelo projeto nº 1760/16.

Embrapa Pesca e Aquicultura, muito obrigado pelo apoio a este trabalho de pesquisa. Obrigado também pelo acolhimento e pelas amizades.

À Fazenda Brejinho, em Pedro Afonso – TO, que não mediu esforços para as demandas desta e outras pesquisas, uma referência na região.

Estou agradecido pelo empenho da Universidade Estadual do Tocantins no experimento de Palmas.

Reconheço as análises concedidas pela Mérieux NutriSciences Brasil (Bioagri).

Também gostaria de agradecer ao Laboratório Multiusuário em Produção Vegetal, por todo o apoio e pelas amizades.

Ao grupo Environmental Soil Chemistry pela oportunidade de estágio e colaborações.

E a minha família, fundamental.

SUMÁRIO

RESUMO	7
ABSTRACT	9
1. Introdução.....	11
Referências	13
2. DESEMPENHO DA SUCESSÃO SOJA – MILHO SEGUNDA SAFRA EM RAZÃO DO SISTEMA DE ADUBAÇÃO E DOSES DE POTÁSSIO	15
Resumo	15
Abstract	15
2.1. Introdução.....	16
2.2. Material e Métodos	17
2.3. Resultados.....	22
2.4. Discussão.....	40
2.5. Conclusão	42
Referências	42
3. EFEITO DO SISTEMA DE ADUBAÇÃO E DOSES DE POTÁSSIO NA RECUPERAÇÃO DE POTÁSSIO DO FERTILIZANTE PELA SUCESSÃO SOJA – MILHO SEGUNDA SAFRA	45
Resumo	45
Abstract	45
3.1. Introdução.....	46
3.2. Material e Métodos	47
3.3. Resultados.....	50
3.4. Discussão.....	60
3.5. Conclusões	62
Referências	62

RESUMO

Época da aplicação de potássio no sistema de produção soja – milho segunda safra

A antecipação de potássio (K) do milho segunda safra na cultura da soja é um sistema de adubação que pode apresentar aproveitamento do K-fertilizante pela sucessão soja – milho similar ao parcelamento de potássio para cada cultura, sem alterar o desempenho da sucessão soja – milho em região de Cerrado. A viabilidade da antecipação do K de base e cobertura do milho na cultura da soja se dá pela aplicação a lanço, que reduz o tempo de reabastecimento da semeadora durante o plantio. Isto permite rápida semeadura do milho para garantir seu desenvolvimento em época de precipitação pluviométrica adequada. O objetivo desta tese foi avaliar o desempenho da sucessão soja – milho, assim como o aproveitamento de K-fertilizante (acúmulo e recuperação), em razão da aplicação de doses de potássio feitas a lanço em dois sistemas de adubação (antecipação e parcelamento). Os estudos de campo foram feitos nas safras 2014/15 e 2015/16 no estado do Tocantins. Os tratamentos foram as doses 0, 60, 120 e 180 kg ha⁻¹ de K₂O com aplicação parcelada (40% - soja e 60% - milho) e antecipada, uma única vez na soja. As avaliações foram acúmulo de biomassa, potássio e magnésio (Mg) na parte aérea das plantas, a concentração K e Mg na folha diagnóstica, e a produtividade de soja e milho. Foram quantificados também, o acúmulo e a recuperação de potássio proveniente do fertilizante por meio de rubídio como traçador de potássio. Os resultados mostraram que antecipação de potássio não alterou a produtividade de grãos das culturas de soja e milho. No entanto, as doses de potássio mostraram efeito positivo na nutrição de K e negativo na de Mg, independente do sistema de adubação. O aproveitamento de K-fertilizante pela sucessão soja-milho foi similar e até superior (22%) para a antecipação de potássio. Portanto, justifica-se ao produtor fazer a aplicação de potássio uma única vez, por ganhar agilidade durante a semeadura do milho.

Palavras-chave: Antecipação de potássio; Parcelamento de potássio; Recuperação de potássio do fertilizante; Acúmulo de potássio; Acúmulo de magnésio

ABSTRACT

Potassium timing application in the soybean – corn succession

Early application is a practice that brings potassium (K) fertilizer from corn to soybean in the soybean – corn succession. Recovery of K-fertilizer by these crops might be similar between early (to soybean) and split (soybean and corn) application, without change crops performance at Cerrado's region. Broadcast application allow these practices because planter stops is reduced: avoiding recharges of fertilizer during corn sowing and ensure a good plant development until the end of rainy season. So, the aim of this dissertation was assess crop's performance, and uptake and recovery of K from fertilizer in the soybean – corn affected by potassium application at two practices (split application and early). Field study was conducted in the rainy season 2014/15 and 2015/16 at Tocantins State, Brazil. Treatments are rates 0, 60, 120 e 180 kg ha⁻¹ of K₂O with two practices: split application (40% - soja e 60% - milho) and early application (once in soybean). Evaluations were aboveground biomass, potassium and magnesium (Mg) accumulation, and leaf K and Mg content, and yield of soybean and corn. Potassium uptake and recovery from fertilizer was measured by rubidium as a tracer of potassium. Results showed that early application did not change grain yield for soybean and corn. However, regardless practice, the rate of potassium showed positive effect on K plant nutrition, whilst negative effect was observed on Mg. Overall, K recovery from fertilizer by soybean – corn succession was similar and higher (22%) for early application. Therefore, farmers can do early application for improve corn sowing.

Keywords: Early application of potassium; Split application potassium; Potassium recovery from fertilizer; Potassium uptake from fertilizer; Magnesium uptake

1. INTRODUÇÃO

O potássio (K) desempenha funções importantes nas plantas e garante a produção das culturas (Oosterhuis et al., 2014). A aplicação de K fertilizante é a maneira de aumentar o teor deste nutriente no solo e garantir a nutrição das culturas, principalmente em áreas intemperizadas de região tropical. Dessa forma, as previsões indicam aumento anual de 2,4% na demanda mundial por K fertilizante até 2020 (FAO, 2017). Contudo, sabe-se que as fontes de K fertilizante comerciais são finitas e o desenvolvimento de novas fontes de K estão em andamento (Basak et al., 2017; Oosterhuis et al., 2014). O Brasil, que é dependente da importação de K fertilizante (FAO, 2017), deve se apoiar em práticas agronômicas como plantio direto, rotação e sucessão de culturas, consórcio de plantas e culturas de cobertura para manter o K absorvido na planta e em camada de solo onde concentram-se efetivamente as raízes das culturas para aumentar o aproveitamento do nutriente e reduzir a perda por lixiviação (Calonego e Rosolem, 2013; Crusciol et al., 2015; Garcia et al., 2008; Rosolem e Calonego, 2013; Rosolem e Steiner, 2017; Tiecher et al., 2017). A soja ocupou 32 e 33 milhões de hectares e produziu em média 3 mil kg ha⁻¹ de grãos nas safras 2014/2015 e 2015/2016, respectivamente (CONAB, 2016a). No entanto, o milho segunda safra ocupou quase 30% da área cultivada com soja e produziu em média 5.716 e 3.904 kg ha⁻¹ de grãos também para as safras 2014/2015 e 2015/2016, respectivamente (CONAB, 2016b).

A sucessão soja (*Glycine max* L.) – milho (*Zea mays* L.), que consiste no plantio da cultura da soja no início da época chuvosa (primeira safra) e a cultura do milho logo após a colheita da primeira safra na mesma estação (segunda safra), é comum e praticada em boa parte das lavouras na região do Cerrado brasileiro. O clima característico da região de Cerrado é de chuva entre primavera-verão, estiagem no outono e seca no inverno (Alvares et al., 2013). No Tocantins a semeadura do primeiro cultivo (soja) ocorre em outubro-novembro, com colheita em fevereiro e logo em seguida ocorre a semeadura do segundo cultivo (milho). A redução no índice pluviométrico durante a fase de enchimento de grãos do milho implica em riscos à produção, e um atraso na semeadura do milho segunda safra após a colheita da soja pode reduzir o potencial produtivo desta cultura em até 39% no Tocantins (Costa et al., 2017).

Como alternativa para estreitar a janela de semeadura do milho safrinha, e assim, semear o milho em menor tempo, sem riscos de perda do potencial produtivo da cultura, é feita a antecipação de K do milho para o período de pré-semeadura da soja (Figura 1). Com isto, aumenta-se a eficiência operacional de semeadura do milho, uma vez que reduz o tempo de reabastecimento da semeadora com o adubo de base. Por outro lado, não se sabe qual a recuperação de potássio na antecipação do adubo para este sistema de produção.

Existem diversos métodos para se investigar a recuperação de potássio do fertilizante nas plantas. O mais utilizado é a de recuperação aparente, que consiste na razão entre a diferença de acúmulo do nutriente pela planta entre tratamentos com e sem fornecimento de K, e a dose de K fertilizante aplicada (Dobermann et al., 1996; Niu et al., 2011). No entanto, a aplicação de K aumenta ainda mais a quantidade de K na planta proveniente do solo em comparação ao tratamento sem aplicação Yao et al. (2003), limitando assim o uso desta metodologia, que também encontra obstáculo na investigação em solos com níveis de fertilidade altos para o potássio. Para tanto, outras opções metodológicas devem ser exploradas. O rubídio (Rb) é utilizado como traçador de potássio em investigações de solo, planta e fertilizante (Buxbaum et al., 2001; Silva et al., 2011; Deist e Talibudeen, 1967; Kuhlmann, 1990; Murphy et al., 1955; Walker e Barber, 1962; Yao et al., 2003). Por meio deste traçador é possível determinar o destino e a recuperação de potássio do fertilizante em sistemas de produção, mesmo nos casos de altos teores de K no solo.

O objetivo da presente pesquisa é obter a recuperação de K-fertilizante no sistema de cultivo mais utilizado no Cerrado brasileiro (soja – milho segunda safra), e propor um sistema de fornecimento de fertilizante com maior aproveitamento do potássio, sem prejudicar o desempenho das culturas.

Legenda:

- K-fertilizante
- Alteração da época de distribuição do K no milho antecipação
- Potássio de fertilizante e solo
- Potássio distribuído sobre o solo ou movimento de K no perfil de solo
- K adsorvido no perfil de solo
- Potássio absorvido pelo sistema radicular ou K removido pela colheita de grãos
- Grão de soja
- K que retorna do resíduo das plantas para o solo
- Resíduo das plantas
- Grão de milho

Figura 1. Esquema do problema que norteou a presente pesquisa.

REFERÊNCIAS

- Alvares, C.A., Stape, J.L., Sentelhas, P.C., De Moraes Gonçalves, J.L., Sparovek, G., 2013. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorol. Zeitschrift* 22, 711–728. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- Basak, B.B., Sarkar, B., Biswas, D.R., Sarkar, S., Sanderson, P., Naidu, R., 2017. Bio-Intervention of Naturally Occurring Silicate Minerals for Alternative Source of Potassium: Challenges and Opportunities, 1st ed, *Advances in Agronomy*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2016.10.016>
- Buxbaum, C.A., Nowak, C.A., White, E.H., 2001. Long-term soil nutrient dynamics and lateral nutrient movement in fertilized and unfertilized red pine plantations. *Biogeochemistry* 55, 269–292. <https://doi.org/10.1023/A:1013239501422>
- Calonego, J.C., Rosolem, C.A., 2013. Phosphorus and potassium balance in a corn-soybean rotation under no-till and chiseling. *Nutr. Cycl. Agroecosystems* 96, 123–131. <https://doi.org/10.1007/s10705-013-9581-x>
- CONAB, 2016a. Acomp. safra bras. grãos, v. 7- Safra 2015/16 - Sétimo levantamento.
- CONAB, 2016b. Acomp. safra bras. grãos, v. 12 Safra 2015/16 - Décimo Segundo levantamento.
- Costa, R.V., Simon, J., Dagma, D.S., Cota, L.V., Almeida, R.E.M., Campos, L.J.M., 2017. Cultivares de milho afetadas pela época de semeadura na safrinha em Tocantins. *Rev. Bras. Milho e Sorgo* 16, 469–480.
- Crusciol, C.A.C., Nascente, A.S., Borghi, E., Soratto, R.P., Martins, P.O., 2015. Improving soil fertility and crop yield in a tropical region with palisadegrass cover crops. *Agron. J.* 107, 2271–2280. <https://doi.org/10.2134/agronj14.0603>
- Deist, J., Talibudeen, O., 1967. Rubidium 86 as a tracer for exchangeable potassium in soils. *Soil Sci.* 104, 119–122.
- Dobermann, A., Cassman, K.G., Sta.Cruz, P.C., Adviento, M.A.A., Pampolino, M.F., 1996. Fertilizer inputs, nutrient balance and soil nutrient supplying power in intensive, irrigated rice system. III. Phosphorus. *Nutr. Cycl. Agroecosystems* 46, 111–125. <https://doi.org/10.1007/BF00704311>
- FAO, 2017. World fertilizer trends and outlook to 2018, Food and Agriculture Organization of United Nations.
- Garcia, R.A., Crusciol, C.A.C., Calonego, J.C., Rosolem, C.A., 2008. Potassium cycling in a corn-brachiaria cropping system. *Eur. J. Agron.* 28, 579–585. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2008.01.002>
- Kuhlmann, H., 1990. Importance of the subsoil for the K nutrition of crops. *Plant Soil* 127, 129–136. <https://doi.org/10.1007/BF00010845>
- Murphy, W.S., Hunter, A.H., Pratt, P.F., 1955. Absorption of rubidium by plants from solution and soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 19, 433–435. <https://doi.org/10.2136/sssaj1955.03615995001900040010x>
- Niu, J., Zhang, W., Chen, X., Li, C., Zhang, F., Jiang, L., Liu, Z., Xiao, K., Assaraf, M., Imas, P., 2011. Potassium fertilization on maize under different production practices in the North China plain. *Agron. J.* 103, 822–829. <https://doi.org/10.2134/agronj2010.0471>
- Oosterhuis, D.M., Loka, D.A., Kawakami, E.M., Pettigrew, W.T., 2014. The physiology of potassium in crop production, *Advances in Agronomy*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800132-5.00003-1>
- Rosolem, C.A., Calonego, J.C., 2013. Phosphorus and potassium budget in the soil–plant system in crop rotations under no-till. *Soil Tillage Res.* 126, 127–133. <https://doi.org/10.1016/j.still.2012.08.003>
- Rosolem, C.A., Steiner, F., 2017. Effects of soil texture and rates of K input on potassium balance in tropical soil. *Eur. J. Soil Sci.* 68, 658–666. <https://doi.org/10.1111/ejss.12460>

- Silva, E.V., Bouillet, J.P., Moraes Gonçalves, J.L., Junior, C.H.A., Trivelin, P.C.O., Hinsinger, P., Jourdan, C., Nouvellon, Y., Stape, J.L., Laclau, J.P., 2011. Functional specialization of Eucalyptus fine roots: Contrasting potential uptake rates for nitrogen, potassium and calcium tracers at varying soil depths. *Funct. Ecol.* 25, 996–1006. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2011.01867.x>
- Tiecher, T., Calegari, A., Caner, L., Rheinheimer, D. dos S., 2017. Soil fertility and nutrient budget after 23-years of different soil tillage systems and winter cover crops in a subtropical Oxisol. *Geoderma* 308, 78–85. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.08.028>
- Walker, J.M., Barber, S.A., 1962. Absorption of potassium and rubidium from the soil by corn roots. *Plant Soil* 17, 243–259. <https://doi.org/10.1007/BF01376227>
- Yao, Y., Yoneyama, T., Hayashi, H., 2003. Potassium uptake by Chinese cabbage (*Brassica pekinensis* Rupr.) from fused potassium silicate, a slow-releasing fertilizer. *Plant Soil* 249, 279–286. <https://doi.org/10.1023/A:1022841017303>

2. DESEMPENHO DA SUCESSÃO SOJA – MILHO SEGUNDA SAFRA EM RAZÃO DO SISTEMA DE ADUBAÇÃO E DOSES DE POTÁSSIO

Resumo

A antecipação do fertilizante potássico do milho na soja pode manter o desempenho da sucessão soja – milho segunda safra em região de Cerrado, quando comparado às aplicações para cada cultura (parcelamento). A aplicação a lanço é oportunidade para que o potássio (K) de base e cobertura do milho sejam antecipados na cultura da soja. Isto permite rápida semeadura do milho para garantir seu desenvolvimento em época de precipitação pluviométrica adequada. Por isso, o objetivo geral deste capítulo é comparar a aplicação de doses de potássio feitas em dois sistemas de adubação (antecipação e parcelamento) no desempenho da sucessão soja – milho. O estudo foi realizado em Pedro Afonso nas safras 2014/15 – 2015/16 e Palmas em 2015/16 no estado do Tocantins - Brasil. A sucessão soja – milho recebeu as doses 0, 60, 120 e 180 kg ha⁻¹ de K₂O aplicadas em parcelamento (40% na soja e 60% no milho) ou antecipação por meio de delineamento em blocos casualizados. As avaliações foram acúmulo de biomassa, potássio e magnésio (Mg) na parte aérea das plantas, a concentração K e Mg na folha diagnóstica, e a produtividade de soja e milho. Os resultados mostraram que a cultura da soja não teve prejuízos nos acúmulos de biomassa, K e Mg pelas plantas, nem na concentração de K foliar, e tampouco na produtividade de grãos. No entanto, a aplicação de potássio reduziu a concentração de Mg foliar da soja. A cultura do milho também não teve prejuízos nos acúmulos de biomassa, K e Mg do milho, nem nas concentrações foliares destes nutrientes, e tampouco alterou a produtividade de grãos. No entanto, as doses de potássio aumentaram o acúmulo de K e a concentração de K foliar do milho, enquanto reduziram o acúmulo e a concentração de Mg em planta e folha, respectivamente. Portanto, justifica-se ao produtor fazer a aplicação de potássio uma única vez, por ganhar agilidade durante a semeadura do milho, desde que os teores de K e Mg trocáveis do solo sejam maiores que 1 e 6 mmol_c dm⁻³, respectivamente.

Palavras-chave: Parcelamento; Antecipação; Acúmulo de magnésio; magnésio foliar; *Glycine max* L.; *Zea mays* L.

Abstract

In the succession soybean – corn potassium (K) early application on soybean with K from corn might be like the split application for crop performance at Cerrado's region. Broadcast application to supply crop demand allow reduce planter stops for fertilizer recharges during corn sowing, also ensure good corn development until the end of rainy season. This chapter was intended to compare potassium rates supplied at two practices (early and split application) for performance during crop development and at harvest for soybean – corn succession at the same crop season. This research was in Pedro Afonso 2014/15 – 2015/16 and Palmas 2015/16 – Tocantins State, Brazil. Treatments were rates of 0, 60, 120 e 180 kg ha⁻¹ K₂O supplied in split application (40% soybean and 60% corn) and early application. Evaluations was biomass, potassium and magnesium (Mg) accumulation in the aboveground, K and Mg on leaf, and grain yield of each crop. Results for soybean showed that early application did not change the profile of biomass, K and Mg accumulation, K leaf content and yield. However, soybean Mg leaf content was reduced with K rates. Corn also had the same soybean's profile for K early application, without change grain yield. –Farmers may apply K fertilizer early due to get an improve during corn sowing.

Keywords: Split application; Early application; Magnesium uptake; Leaf magnesium; *Glycine max* L.; *Zea mays* L.

2.1. Introdução

O milho segunda safra ocupou quase 30% da área cultivada com soja nas safras 2014/2015 e 2015/2016 no Brasil, respectivamente (CONAB, 2016ab). A sucessão soja – milho representa grande parte das áreas agrícolas na região do Cerrado e de acordo com Alvares et al. (2013) o clima característico desta região é de chuva entre primavera-verão, estiagem no outono e seca no inverno. A semeadura da soja é feita em outubro-novembro, com colheita em fevereiro, e em seguida ocorre a semeadura do milho. O milho de segunda safra se desenvolve em meio a riscos de estiagem e o atraso na semeadura implica em redução da produtividade da cultura (Garcia et al., 2018). Como tentativa de agilizar a semeadura do milho segunda safra, tem se observado práticas de adubação para a sucessão soja – milho com a aplicação a lanço feita antes mesmo da semeadura da soja, em uma única aplicação. A vantagem desta prática é aumentar o rendimento da semeadura com redução ou eliminação do reabastecimento do adubo de base na semeadora para ambas as culturas. A prática é empregada para o potássio (K) e outros nutrientes, entretanto existem poucas informações sobre a comparação de desempenho da sucessão soja – milho entre o parcelamento para cada cultura e a antecipação de potássio na soja.

Os estudos de Parvej et al. (2015) na cultura da soja e de Qiu et al. (2014) no milho mostraram que o nível de fertilidade do solo interferiu em até 15% na produtividade dos cultivos. Oltmans e Mallarino (2015) observaram que a aplicação de potássio aumentou a frequência de resposta do acúmulo de K na parte aérea em relação aos grãos de soja e milho, e consequentemente aumentou o teor de K no solo após a colheita dos grãos. No entanto, antecipação de potássio pode implicar em redução no desempenho da sucessão soja – milho pelas perdas do K para camadas fora do alcance de raízes das plantas, principalmente nas lavouras com solos de textura média-arenosa, recém expandidas da região do Cerrado.

A aplicação de potássio na semeadura da soja não atendeu o acúmulo de K durante o desenvolvimento da vagem e o enchimento de grãos, causando redução da produtividade (Kolar e Grewal, 1994), apesar de Rosolem e Nakagawa (2001) observarem que a soja respondeu em produtividade ao efeito da adubação residual de potássio. No milho, Heckman e Kamprath (1992) observaram que a dose de potássio não alterou a produtividade, apesar de aumentar o acúmulo de potássio nas plantas. O estudo recente de Rosolem e Steiner (2017) com sistema de rotação de culturas mostrou que a produção de grãos respondeu às doses de potássio, apesar de estimarem perdas de potássio (lixiviação) mesmo com plantas de cobertura na entresafra. Além dos riscos apresentados, a antecipação de potássio na soja amplia o teor deste nutriente no solo e causa efeitos de interação com o magnésio, reduzindo a absorção pela planta em razão da inibição competitiva. Moreira et al. (2015) observaram tal efeito pela redução na concentração de magnésio na folha diagnóstica e no teor de Mg trocável do solo. No milho, Bruns e Ebelhar (2006) obtiveram efeito negativo do potássio na concentração de Mg na folha diagnóstica.

As hipóteses são de que a antecipação da aplicação de potássio: I) amplia o acúmulo e a nutrição de K, enquanto reduz o Mg, sem alterar a produtividade de grãos para a cultura da soja; e II) mantém o desenvolvimento da cultura e não altera a produção de grãos do milho. Portanto, o objetivo deste capítulo é comparar a nutrição foliar e o acúmulo de potássio e magnésio na sucessão soja – milho, assim como a produtividade de grãos, em razão de doses de potássio feitas em dois sistemas de adubação (antecipação e parcelamento).

2.2. Material e Métodos

2.2.1. Descrição dos Locais

Três experimentos com a sucessão soja (*Glycine max* L.) – milho (*Zea mays* L.) foram conduzidos entre os períodos de primavera (semeadura soja) e início do inverno (colheita milho) nos municípios de Pedro Afonso e Palmas no Estado do Tocantins, Brasil. O clima da região é classificado como Aw – clima tropical de verão chuvoso e inverno seco (Koeppen). O período chuvoso se concentra entre os meses de dezembro e fevereiro (mais de 250 mm mensal) e o seco entre maio e setembro. O índice pluviométrico anual é 1.600 mm e 25 °C é a temperatura média anual (Alvares et al., 2013).

O experimento 1 (E1) foi conduzido na fazenda Brejinho no município de Pedro Afonso (9°06'00.9"S 48°08'33.1"W) durante a safra de 2014/2015. Na safra seguinte (2015/2016) e ao lado do E1 foi implantado o experimento 2 (E2) (9°06'01.4"S 48°08'37.7"W). Nesta mesma safra, houve a implantação do experimento 3 (E3) no município de Palmas (10°23'59.6"S 48°21'49.9"W) em área experimental da Universidade Estadual do Tocantins.

A área do município de Pedro Afonso apresentou a cultura da soja como protagonista desde o ano de 1988 e em 1995 contou com a adoção do plantio direto. A partir de 2006, após três safras de sucessão soja – milho, esta área recebeu pastagem para engorda do gado de corte durante um ano e meio. Já a área do E3, encontrava-se em pousio com capim *Andropogon* e foi convertida para lavoura em 2015 por meio de calagem, adubação, arações e gradagens. Todas as amostras de solo foram coletadas antes da implantação dos experimentos. A Tabela 1 mostra os resultados das análises químicas dos solos do E1 para a camada de 0-0,2m, enquanto a Tabela 2 contém os resultados das análises em camadas de 0,2m até profundidade de 0,6m para os E2 e E3. Os solos do E1, E2 e E3 continham 53, 52 e 35% de argila, 17, 19 e 5% de silte, e 30, 29 e 60% de areia, respectivamente. A classificação dos solos obtida foi Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico típico (EMBRAPA, 2006). A Figura 2 mostra o índice pluviométrico, a temperatura média por decêndio, e as informações sobre semeadura e colheita das culturas de soja e milho cultivadas em sucessão para cada experimento.

O índice pluviométrico em Palmas (E3) foi menor e com distribuição desuniforme em comparação à de Pedro Afonso (E1 e E2) (Figura 2). O desenvolvimento da cultura da soja no E1 contou com 825 mm de precipitação, dos quais 150 mm (18% do total) foram concentrados no terceiro decêndio de novembro (Figura 2a). Ainda no E1, o milho cultivado em sucessão recebeu somente 504 mm de precipitação do primeiro decêndio de março até o segundo decêndio de maio. A chuva no milho se concentrou nos períodos de estabelecimento inicial e desenvolvimento vegetativo, e não houve precipitação durante o mês anterior à colheita. A soja conduzida no E2 contou com 806 mm de chuvas, 47% delas durante o mês de janeiro (~300 mm em 20 dias), e somente 50 mm no período de enchimento de grãos em fevereiro (Figura 2b). O milho conduzido em sucessão recebeu 420 mm de precipitação, dos quais 56% ocorreu nos vinte dias após a semeadura do milho. A soja cultivada no E3 contou com 656 mm de chuva, sendo 80% concentrada no mês de janeiro (Figura 2c). Para este mesmo local choveu apenas 112 mm em todo o período de desenvolvimento da cultura do milho, dos quais 76% desse volume concentrado nos primeiros 50 dias. O milho cultivado no ano de 2016 recebeu precipitação de 25 mm no E3 e 34 mm no E2 antes da colheita (Figura 2b e 2c).

Tabela 1. Resultado da análise química de solo¹ (0-0,2m) para Pedro Afonso na safra 2014/2015 (experimento 1).

pH	MO	P _{Mehlich-1}	K _{Mehlich-1}	Ca	Mg	Al	H+Al	CTC	V
H ₂ O	g kg ⁻¹	mg dm ⁻³				cmol _c dm ⁻³			%
5,6	44	12,3	155	2,6	1,1	0,1	5,1	9,1	44

¹Obtida de acordo com a CQFS-RS/SC (2004).**Tabela 2.** Resultado da análise química de solo¹ para Pedro Afonso e Palmas na safra 2015/2016 (experimentos 2 e 3).

Experimento	Camada	pH	MO	P _{resina}	K _{resina}	Ca	Mg	H+Al	Al	SB	CTC	V
		CaCl ₂	g dm ⁻³	mg dm ⁻³			mmol _c dm ⁻³					%
Pedro Afonso	0-0,2	4,8	32	24	1,5	15	6	52	2	23	75	30
	0,2-0,4	4,4	18	4	1,2	9	4	47	4	14	61	23
	0,4-0,6	4,7	14	4	1,0	7	3	34	2	11	45	24
Palmas	0-0,2	5,5	14	4	1,2	11	7	22	1	19	41	47
	0,2-0,4	4,5	7	4	0,5	5	4	28	4	10	38	25
	0,4-0,6	4,5	7	4	0,1	4	3	28	2	7	35	20

¹Obtida de acordo com Raij et al. (2001).

Figura 2. Precipitação pluviométrica acumulada e temperatura média do ar por decêndios durante a condução dos experimentos em Pedro Afonso 2014/2015 – E1 (a), Pedro Afonso 2015/2016 – E2 (b) e Palmas 2015/2016 – E3 (c). As letras maiúsculas seguidas de setas indicam a época de semeadura de soja (SS) e milho (SM), e a colheita de soja (CS) e milho (CM).

2.2.2. Delineamento e Campo Experimental

O delineamento experimental para a sucessão soja – milho foi blocos ao acaso com oito tratamentos em esquema fatorial 4 x 2, e quatro repetições. Os tratamentos consistiram nas doses 0 (K0), 60 (K60), 120 (K120) e 180 (K180) kg ha⁻¹ de K₂O (KCl) fornecidos à sucessão soja – milho em dois sistemas de adubação: Parcelamento – 40% da dose na cultura da soja e 60% na cultura do milho; e Antecipação – dose aplicada uma única vez, na cultura da soja (Tabela 3). Já o delineamento experimental para a cultura da soja foi de sete doses de K₂O em blocos ao acaso com quatro repetições: 0 (K0), 24 (K24), 48 (K48), 60 (K60), 72 (K72), 120 (K120) e 180 (K180) kg ha⁻¹ (Soja¹ – Tabela 3). Os tratamentos foram aplicados a lanço e aos seis dias após a semeadura.

Tabela 3. Doses de potássio fornecidas à sucessão soja – milho em razão do sistema de adubação (parcelamento e antecipação).

Sucessão soja – milho	Soja ¹	Milho
Dose K ₂ O (kg ha ⁻¹)		
	Parcelamento	
0	0	0
60	24	36
120	48	72
180	72	108
	Antecipação	
0	0	0
60	60	0
120	120	0
180	180	0

Parcelamento: 40% da dose fornecida na soja e 60% no milho.

Antecipação: dose de potássio do milho aplicada antes, na cultura da soja.

¹ As avaliações na cultura da soja seguiram delineamento de blocos ao acaso com quatro repetições de sete doses de K₂O: 0 (K0), 24 (K24), 48 (K48), 60 (K60), 72 (K72), 120 (K120) e 180 (K180) kg ha⁻¹, em que os dados para a dose K0 foram provenientes de média aritmética entre os tratamentos controles de parcelamento e antecipação.

As parcelas foram compostas por 11 fileiras de plantas de 10m de comprimento cada, espaçadas a meio metro entre si. A cultivar de soja utilizada foi a ST820RR e a população de plantas foi de 423, 396 e 227 mil ha⁻¹ no E1, E2 e E3, respectivamente. Acredita-se que a redução da população de plantas em E3 se deu pelo ataque de lagarta-elasmó (*Elasmopalpus lignosellus*). As populações de milho foram de 58, 48 e 55 mil plantas ha⁻¹ no E1, E2 e E3, respectivamente. O híbrido de milho utilizado no E1 foi o Syngenta Impacto e para E2 e E3 foi o LG6304. A soja foi semeada no quinto dia do mês de novembro no E1 e E2, e no dia 26 de novembro no E3. A colheita da soja foi realizada em 28/02/2015 no E1, em 25/02/2016 no E2 e em 11/03/2016 no E3. O milho foi semeado em 01/03/2015 no E1, em 26/02/2016 no E2 e 15/03/2016 no E3, com colheitas realizadas em 25/06/2015, 30/06/2016 e 16/06/2016, respectivamente.

A sucessão soja – milho recebeu 80 e 118 kg ha⁻¹ de P₂O₅ no E1 e E2 respectivamente, a lanço, no mês de setembro, antes da semeadura da soja e seguiu o padrão adotado pela fazenda. Já no E3, o fósforo foi aplicado no sulco de semeadura e a dose foi de 91 e 125 kg ha⁻¹ de P₂O₅ para as culturas da soja e do milho, respectivamente. As sementes de soja receberam inoculação de bactérias fixadoras de nitrogênio (*Bradyrhizobium japonicum* - cepas SEMIA 5079 e 5080) em todos os experimentos. Em E1 e E2 a inoculação foi feita com 4 L ha⁻¹ de inoculante líquido com concentração de 5 x 10⁹ unidades formadoras de colônia por mililitro aplicados no sulco de semeadura. Além disso, o histórico de inoculação destas bactérias nas sementes de soja foi anual para a área de Pedro Afonso. No entanto,

em E3 não se conhecia o histórico de inoculação com bactérias e não havia equipamento para aplicação no sulco de semeadura. Por isso, esta inoculação foi feita nas sementes, além de duas aplicações sobre o solo da área experimental sete dias antes e depois da semeadura. O E3 recebeu três vezes mais quantidade de bactérias que os outros experimentos. A cultura do milho recebeu 120 kg ha⁻¹ N-ureia com aplicação a lanço no estágio vegetativo de quatro folhas em todos os experimentos.

2.2.3. Acúmulo de Biomassa, Potássio e Magnésio Durante o Desenvolvimento da Sucessão Soja – Milho

As coletas de amostras para obtenção do acúmulo de biomassa (AB) pela parte aérea da soja foram feitas aos 26, 34, 42, 62, 84 e 105 dias após a emergência das plantas, em V5, V7, R2, R5, R5.5 e R7 (Fehr et al., 1971), respectivamente. Na cultura do milho essas coletas foram realizadas aos 20, 39, 55, 75 e 121 dias após a emergência, ou seja, V4, V9, R2, R4 e R6 (Ritchie et al., 1986). A amostra para AB na cultura da soja foi proveniente de quatro plantas por parcela, enquanto no milho foram coletadas três plantas. A mesma amostra para AB foi utilizada na determinação do acúmulo de potássio (AK) e magnésio (AMg). Não foi quantificado o Mg na última coleta de AB para as culturas. O material vegetal foi desidratado em estufa a temperatura de 65°C até massa constante. As amostras foram moídas em moinho multiuso (MA630, Marconi – Brasil) e depois o material passou por peneira de 200 µm. As concentrações de K e Mg foram determinadas com espectrômetro de fluorescência de raios-X por energia dispersiva (EDX-720, Shimadzu – Japão), conforme descrito por Tezotto et al. (2013).

2.2.4. Concentração de Potássio e Magnésio na Folha Diagnóstica de Soja e Milho

As folhas amostradas para quantificar a concentração de K e Mg foram amostradas do trifólio do quarto nó abaixo do ápice de seis plantas de soja no estágio R2 (Fehr et al., 1971) e do terço central da lâmina foliar (sem nervura) oposta e abaixo à espiga no estágio R1 (Ritchie et al., 1986) no milho. Os procedimentos utilizados para o preparo de amostra e a determinação da concentração de K e Mg são descritos no tópico anterior.

2.2.5. Produtividade de Grãos das Culturas de Soja e Milho

Os grãos de soja e milho obtidos para produtividade foram colhidos em área de 15 m² (3 fileiras de 10m), com exceção da soja conduzida em E1 que tiveram os grãos colhidos em 5 m² (5 fileiras de 2 m). A colheita da soja se deu sempre no estágio fenológico R8 (Fehr et al., 1971), com a umidade do grão entre 14-22%. No E1 a coleta de plantas foi manual e a trilha destas plantas foi em trilhadora elétrica (IPL, Imack – Brasil). Já no E2 e E3, as amostras de grãos foram obtidas por meio de colhedora de parcelas (Classic, Wintersteiger – Áustria). Para o milho, as espigas foram colhidas após o estágio fenológico R6 (Ritchie et al., 1986) e debulhadas em debulhador elétrico (DM50, Trapp – Brasil). A umidade dos grãos de milho variou entre 17-25% de acordo com a parcela e o experimento. A produtividade de grãos foi obtida após ajuste da massa de grãos para 130 g kg⁻¹ de H₂O.

2.2.6. Análise Estatística

Os procedimentos estatísticos dos dados foram realizados no Statistical Analysis System, version 9.2 (SAS Institute, 2009). Os pressupostos de normalidade do erro e homogeneidade da variância foram testados por PROC UNIVARIATE (Shapiro Wilk) e PROC TRANSREG (Box-Cox), respectivamente. Quando não satisfeitos os pressupostos, a variável foi transformada de acordo com o lambda conveniente. A análise da variância para os dados relacionados à produtividade, e K e Mg na folha diagnóstica da soja foi feita pelo PROC GLM. Neste caso, experimento, dose de potássio e as interações foram consideradas como efeito fixo no modelo, enquanto as repetições foram consideradas de efeito aleatório. Da mesma forma, os dados do milho e soja + milho foram testados para análise da variância pelo PROC GLM e o efeito fixo no modelo foram experimento, dose de potássio, sistema de adubação, assim como as interações. E as repetições também foram consideradas efeito aleatório. Quando a probabilidade do teste F foi $<0,05$, as medias foram ajustadas com equação linear pelo PROC REG, e os parâmetros dos modelos comparados pelo intervalo de confiança. Os dados relacionados ao desenvolvimento das culturas ao longo da safra foram submetidos a análise multivariada de perfis, realizada pelo comando de repetição no tempo. Os perfis foram comparados para efeitos de paralelismo, coincidência e horizontalidade por meio do comando contraste.

2.3. Resultados

2.3.1. Cultura da Soja

2.3.1.1. Acúmulo de biomassa, potássio e magnésio durante o desenvolvimento da soja

O teste de esfericidade de Mauchly resultou em $p < 0,05$ para as medidas repetidas no tempo (perfil) e validou os pressupostos de normalidade e homogeneidade da variância para o acúmulo de biomassa (AB), potássio (AK) e magnésio (AMg) pela parte aérea da cultura da soja. Não houve interação entre experimento x dose e tempo x dose ($p > 0,05$).

Não houve diferença significativa para a média do perfil de AB pela soja entre as doses de potássio (K0, K24, K48, K60, K72, K120 e K180) em E1, E2 e E3 (Figura 3). Isto indicou que as doses de potássio não afetaram o perfil de AB. A média de AB entre as doses de cada coleta foi 292, 1.010, 2.395, 6.139, 7.339 e 7.090 kg ha⁻¹ em E1, 318, 991, 2.068, 5.254, 7.766 e 8.584 kg ha⁻¹ em E2 e 130, 539, 1.572, 3.584, 5.875 e 5.222 kg ha⁻¹ em E3. O acúmulo de biomassa na cultura da soja estabilizou próximo aos 84 dias após a emergência em E1 e E3, enquanto que no E2 o AB pela soja se manteve até os 105 dias após a emergência. Ressalta-se a participação dos grãos no AB. O perfil de AB foi diferente ($p < 0,001$) entre experimentos (E2 > E1 > E3). A média de AB entre doses e coletas foi 4.163, 4.044 e 2.820 kg ha⁻¹ para os E2, E1 e E3, respectivamente.

O perfil de AK pela soja foi alterado em razão da dose de K₂O em E1 (Figura 4a). A média de AK para o perfil K0, K24, K48, K60, K72, K120 e K180 foi 70, 70, 72, 66, 80, 75 e 83 kg ha⁻¹, respectivamente. As doses K72, K120 e K180 aumentaram o AK pela soja. A média entre coletas e perfis para K72, K120 e K180 foi 11% superior à média de K0, K24, K48 e K60. A média dos perfis K72, K120 e K180 revelou AK de 6, 27, 50, 125, 140 e 127 kg ha⁻¹ aos 26, 34, 42, 62, 84 e 105 dias após a emergência, respectivamente. Estes perfis mostraram AK maior aos 84 dias

(R5.5) enquanto os demais foram aos 62 dias (116 kg ha^{-1}). Em E2 e E3, a dose de potássio não interferiu ($p > 0,05$) no perfil de AK da soja. O perfil de AK em E2 foi 8, 25, 51, 121, 137 e 153 kg ha^{-1} (Figura 4b) e em E3 foi 3, 6, 24, 61, 74 e 67 kg ha^{-1} (Figura 4c).

Figura 3. Perfil gráfico do acúmulo de biomassa pela parte aérea (AB, em kg ha^{-1}) da soja em razão da dose de 0 (K0), 24 (K24), 48 (K48), 60 (K60), 72 (K72), 120 (K120) e 180 (K180) $\text{kg ha}^{-1} \text{ K}_2\text{O}$ em Pedro Afonso durante 2014-2015 – E1 (a) e 2015-2016 – E2 (b) e Palmas entre 2015 e 2016 – E3 (c). As coletas foram realizadas nos estádios fenológicos: V5, V7, R2, R5, R5.5 e R7. Letras minúsculas distintas ao lado da legenda indicam diferenças entre perfis para cada local conforme a MANOVA ($p < 0,05$).

O acúmulo de magnésio pela parte aérea da soja não diferiu para as doses de potássio (Figura 5). Os perfis foram diferentes apenas entre os experimentos ($p < 0,001$). A média para o AMg no ciclo de desenvolvimento da soja foi: E3 (13 kg ha⁻¹) > E1 (11 kg ha⁻¹) > E2 (10 kg ha⁻¹). Em E1, a média do perfil de AMg foi 1, 4, 9, 19 e 25 kg ha⁻¹, em E2 foi 1, 3, 7, 17 e 24 kg ha⁻¹ e em E3 foi 1, 4, 10, 23 e 29 kg ha⁻¹. Aos 84 dias após a emergência as plantas de soja acumularam a maior quantidade de magnésio.

Figura 4. Perfil gráfico do acúmulo de potássio (AK, em kg ha⁻¹) pela parte aérea da cultura da soja em razão da dose 0 (K0), 24 (K24), 48 (K48), 60 (K60), 72 (K72), 120 (K120) e 180 (K180) kg ha⁻¹ K₂O em Pedro Afonso durante 2014-2015 – E1 (a) e 2015-2016 – E2 (b) e Palmas entre 2015 e 2016 – E3 (c). As coletas foram realizadas nos estádios fenológicos: V5, V7, R2, R5, R5.5 e R7. Letras minúsculas distintas ao lado da legenda indicam diferenças entre perfis para cada local conforme a MANOVA ($p < 0,05$).

Figura 5. Perfil gráfico do acúmulo de magnésio (AMg, em kg ha⁻¹) pela parte aérea da cultura da soja em razão da dose 0 (K0), 24 (K24), 48 (K48), 60 (K60), 72 (K72), 120 (K120) e 180 (K180) kg ha⁻¹ K₂O em Pedro Afonso durante 2014-2015 – E1 (a) e 2015-2016 – E2 (b) e Palmas entre 2015 e 2016 – E3 (c). As coletas foram realizadas nos estádios fenológicos: V5, V7, R2, R5 e R5.5. Letras minúsculas distintas ao lado da legenda indicam diferenças entre perfis para cada local conforme a MANOVA ($p < 0,05$).

2.3.1.2. Concentração de potássio e magnésio na folha diagnóstica da soja

A concentração de K na folha diagnóstica da soja não diferiu ($p > 0,05$) para as doses de potássio nos três experimentos. O ajuste de modelo linear entre concentração de potássio na folha e dose de K_2O não foi significativo ($p > 0,05$) em E1 (Figura 6). Em E1, a soja apresentou média de 24 g kg^{-1} de potássio na folha diagnóstica. Da mesma forma, o modelo linear de E2 não foi significativo ($p > 0,05$) para a concentração de potássio na folha. Para este experimento, a média da concentração de K foi 27 g kg^{-1} . No entanto, o ajuste de modelo linear em E3 foi significativo ($p < 0,05$) para o K da folha. Uma unidade de K_2O (kg ha^{-1}) aumentou $0,02$ gramas de K na folha diagnóstica. O K180 aumentou em 16% a concentração de K na folha em comparação ao K0. Não houve interação entre experimento e dose ($p > 0,05$).

Figura 6. Concentração de potássio na folha diagnóstica de soja em razão da dose de potássio (0, 24, 48, 60, 72, 120 e 180 kg ha^{-1} K_2O) em Pedro Afonso 2014/2015 (E1), Pedro Afonso 2015/2016 (E2) e Palmas 2015/2016 (E3). Os modelos lineares são: E1 $f(y) = 0,01x + 23,23$ ($R^2 0,26\text{ns}$); E2 $f(y) = -0,007x + 27,35$ ($R^2 0,13\text{ns}$); E3 $f(y) = 0,02x + 18,51$ ($R^2 0,63^*$). ns não significativo; * significativo ($p < 0,5$); ** significativo ($p < 0,01$) pelo teste F.

A concentração de magnésio na folha diferiu ($p < 0,01$) em razão da dose de potássio. Os modelos lineares ajustados para concentração de Mg e dose de potássio foram significativos apenas em E2 e E3 (Figura 7). A concentração de Mg na folha de soja reduziu $0,003$ e $0,004 \text{ g kg}^{-1}$ por unidade de K_2O em E2 e E3, respectivamente. A concentração de Mg foi $3,5 \text{ g kg}^{-1}$ em E1, enquanto que em E2 reduziu de $3,3 \text{ g kg}^{-1}$ (K0) até $2,8 \text{ g kg}^{-1}$ (K180), e em E3 de $5,99 \text{ g kg}^{-1}$ (K0) até $5,27 \text{ g kg}^{-1}$ (K180). Não houve interação entre dose x experimento ($p > 0,05$).

Figura 7. Concentração de magnésio na folha diagnóstica de soja em razão da dose de potássio (0, 24, 48, 60, 72, 120 e 180 kg ha⁻¹ K₂O) em Pedro Afonso 2014/2015 (E1), Pedro Afonso 2015/2016 (E2) e Palmas 2015/2016 (E3). Os modelos lineares são: E1 $f(y) = -0,001x + 3,59$ (R^2 0,83ns); E2 $f(y) = -0,003x + 3,32$ (R^2 0,76**); E3 $f(y) = -0,004x + 5,99$ (R^2 0,27*). ns não significativo; * significativo ($p < 0,5$); ** significativo ($p < 0,01$) pelo teste F.

2.3.1.3. Produtividade de grãos da soja

A produção de grãos pela soja não diferiu em razão da dose de potássio ($p > 0,05$). Em E1, a produção de soja foi 3.439 kg ha⁻¹ e o ajuste de modelo linear entre produção de grãos e dose de potássio não apresentou significância (Figura 8). A soja de E2 produziu 3.338 kg ha⁻¹ de grãos e o modelo também não foi significativo. No entanto, o modelo linear ajustado para E3 foi significativo ($p < 0,01$) e revelou taxa de incremento na produção de grãos da ordem de 2,47 kg por unidade de K₂O. Neste experimento a produção de grãos na dose K0 foi 1.745 kg ha⁻¹ e aumentou para 2.190 kg ha⁻¹ na dose K180 (20%). A produção de grãos de soja em E1 (3.439 kg ha⁻¹) foi igual ao E2 (3.338 kg ha⁻¹), no entanto foram superiores ao E3 (1.923 kg ha⁻¹). Não houve interação entre experimento e dose.

Figura 8. Produtividade de grãos na cultura da soja em razão da dose de potássio (0, 24, 48, 60, 72, 120 e 180 kg ha⁻¹ K₂O) em Pedro Afonso 2014/2015 (E1), Pedro Afonso 2015/2016 (E2) e Palmas 2015/2016 (E3). Os modelos lineares ajustados são: E1 $f(y) = -0,03x + 3.441,2$ (R^2 0,01ns); E2 $f(y) = -0,80x + 3.395,9$ (R^2 0,31ns); E3 $f(y) = 2,47x + 1.745,5$ (R^2 0,46**). ns não significativo; ** significativo ($p < 0,01$) pelo teste F.

2.3.2. Cultura do Milho

2.3.2.1. Acúmulo de biomassa, potássio e magnésio durante o desenvolvimento do milho

O sistema de adubação não alterou o perfil do AB pela cultura do milho no E1, E2 e E3 (Figura 9). Em geral, a média do perfil de AB foi 7.379, 5.767 e 1.899 kg ha⁻¹ no E1, E2 e E3, respectivamente. As doses de potássio não alteraram o perfil do AB no E1 e E2 (Figura 10). No E1 a média entre doses do perfil de AB foi 301, 2.315, 6.863, 11.072 e 16.345 kg ha⁻¹. Para o E2 foi 237, 2.284, 4.710, 9.406 e 12.199 kg ha⁻¹. No entanto, no E3 o perfil do AB pelo milho diferiu para as doses (Figura 10). Para este perfil, a média do AB no milho entre as doses K120 e K180 (2.108 kg ha⁻¹) foi superior à média entre K0 e K60 (1.691 kg ha⁻¹). No E3 a média entre as doses K120 e K180 para o perfil de AB no milho de 322, 1.060, 3.580 e 3.466 kg ha⁻¹ de acordo com a coleta, enquanto a média entre as menores doses (K0 e K60) foi 313, 749, 2.895 e 2.805 kg ha⁻¹. Em geral, no E3 o AB pelo milho foi máximo aos 55 dias após a emergência quando a redução no índice pluviométrico interferiu no desenvolvimento da cultura (Figura 2c).

O perfil para o AK pelo milho não diferiu entre os sistemas de adubação no E1 (96 kg ha⁻¹) e no E2 (95 kg ha⁻¹) (Figura 11). No entanto, no E3 o perfil do AK foi maior para a antecipação (20 kg ha⁻¹) de potássio do que para o parcelamento (17 kg ha⁻¹). As doses de potássio alteraram o perfil do AK pelo milho dos três experimentos (Figura 12). No E1 a média entre as doses K0 e K60 para o perfil de AK foi 87 kg ha⁻¹, enquanto o AK pelo milho

nas doses K120 e K180 foi 100 e 111 kg ha⁻¹, respectivamente. No E2 a média para o perfil de AK pelo milho foi igual entre as doses K0, K60 e K120 (92 kg ha⁻¹) e a dose K180 foi maior (104 kg ha⁻¹). No E3 os perfis do AK pelo milho para as doses de potássio se comportaram semelhante aos perfis de AB. Este experimento revelou média do perfil de AK no milho de 23 kg ha⁻¹ entre as doses K120 e K180, que foi superior à média entre K0 e K60 (13 kg ha⁻¹). Ainda para o E3, a média entre as doses K120 e K180 para o perfil de AB no milho de 6, 17, 42 e 28 kg ha⁻¹ de acordo com a coleta, enquanto a média entre as menores doses (K0 e K60) foi 4, 8, 23 e 17 kg ha⁻¹.

O sistema de adubação do potássio não interferiu no perfil do AMg pelo milho nos três experimentos (Figura 13). Em geral, a média do perfil de AMg foi 7, 6 e 7 kg ha⁻¹ no E1, E2 e E3, respectivamente. As doses de potássio alteraram o perfil do AMg pelo milho dos três experimentos (Figura 14). No E1 a dose K0 apresentou média do perfil de AMg no milho de 8 kg ha⁻¹, enquanto entre as doses K60, K120 e K180 foi igual a 7 kg ha⁻¹. No E2 a dose K0 apresentou média do perfil de AMg pelo milho de 7 kg ha⁻¹, enquanto nas doses K60 e K120 o milho acumulou 6 kg ha⁻¹ em média, e na dose K180 o AMg foi de apenas 5 kg ha⁻¹. No E3 a dose K0 apresentou média do perfil para o AMg pelo milho de 8 kg ha⁻¹, enquanto a média entre as doses K60, K120 e K180 foi igual a 6 kg ha⁻¹.

Figura 9. Perfil gráfico da média entre doses de potássio para o acúmulo de biomassa (AB) na cultura do milho em razão do sistema de adubação (parcelamento e antecipação) entre os anos de 2014 e 2015 em Pedro Afonso (a), 2015-2016 em Pedro Afonso (b), e 2015-2016 em Palmas (c). As coletas das plantas foram nos estádios fenológicos: V4, V9, R2, R4 e R6.

Figura 10. Perfil gráfico da média entre sistemas de adubação para o acúmulo de biomassa (AB) na cultura do milho em razão da dose de potássio (0, 60, 120 e 180 kg ha⁻¹ K₂O) entre os anos de 2014 e 2015 em Pedro Afonso (a), 2015-2016 em Pedro Afonso (b), e 2015-2016 em Palmas (c). As coletas das plantas foram nos estádios fenológicos: V4, V9, R2, R4 e R6.

Figura 11. Perfil gráfico da média entre doses de potássio para o acúmulo de potássio (AK) no milho em razão do sistema de adubação (parcelamento e antecipação) entre os anos de 2014 e 2015 em Pedro Afonso (a), 2015-2016 em Pedro Afonso (b), e 2015-2016 em Palmas (c). As coletas das plantas foram nos estádios fenológicos: V4, V9, R2, R4 e R6.

Figura 12. Perfil gráfico da média entre sistemas de adubação para o acúmulo de potássio (AK) no milho em razão da dose de potássio (0, 60, 120 e 180 kg ha⁻¹ K₂O) entre os anos de 2014 e 2015 em Pedro Afonso (a), 2015-2016 em Pedro Afonso (b), e 2015-2016 em Palmas (c). As coletas das plantas foram nos estádios fenológicos: V4, V9, R2, R4 e R6.

Figura 13. Perfil gráfico da média entre doses de potássio para o acúmulo de magnésio (AMg) no milho em razão sistema de adubação (parcelamento e antecipação) entre os anos de 2014 e 2015 em Pedro Afonso (a), 2015-2016 em Pedro Afonso (b), e 2015-2016 em Palmas (c). As coletas das plantas foram nos estádios fenológicos: V4, V9, R2 e R4.

Figura 14. Perfil gráfico da média entre sistemas de adubação para o acúmulo de magnésio (AMg) no milho em razão da dose de potássio (0, 60, 120 e 180 kg ha⁻¹ K₂O) entre os anos de 2014 e 2015 em Pedro Afonso (a), 2015-2016 em Pedro Afonso (b), e 2015-2016 em Palmas (c). As coletas das plantas foram nos estádios fenológicos: V4, V9, R2 e R4.

2.3.2.2. Concentração de potássio e magnésio na folha diagnóstica do milho

A concentração de potássio na folha diagnóstica do milho não diferiu ($p > 0,05$) entre sistema de adubação em todos os experimentos (Figura 15). No entanto, a dose de potássio alterou ($p < 0,001$) a concentração de potássio na folha. A dose K0 resultou em concentração de K na folha de 22, 26 e 7 g kg⁻¹ em E1, E2 e E3. No E1 a média entre sistema de adubação e dose para o K na folha foi 23 g kg⁻¹ (Figura 15a). Não houve ajuste dos modelos lineares para a concentração de K na folha no E1 em nenhum dos sistemas de adubação. Da mesma forma, no E2 não houve ajuste de modelo linear para o acúmulo de K na folha e a concentração foi 27 g kg⁻¹ em média (Figura 15b). No entanto, no E3 a concentração de potássio na folha do milho apresentou modelo linear significativo para parcelamento e antecipação de potássio (Figura 15c). Em geral, a inclinação dos modelos foi positiva e revelou aumento na concentração de K na folha em resposta à adubação de potássio. A concentração de K na folha aumentou em taxa de 0,03 g kg⁻¹ por unidade de K₂O entre os modelos para sistema de adubação em razão da sobreposição dos limites de confiança destes modelos. Neste experimento, a concentração de K na folha do milho variou entre 6 g kg⁻¹ (K0) e 11 g kg⁻¹ (K180) no parcelamento, e entre 8 g kg⁻¹ (K0) e 11 g kg⁻¹ (K180) na antecipação do potássio. Não foi observado nenhuma interação ($p > 0,05$).

A concentração de Mg na folha apresentou interação experimento x sistema de adubação ($p < 0,04$) e experimento x dose ($p < 0,03$) (Figura 15). A interação que envolveu sistema de adubação ocorreu porque no E1 a concentração de Mg na folha foi 30% maior na antecipação (1,1 g kg⁻¹) em comparação ao parcelamento (0,8 g kg⁻¹), enquanto que no E2 e E3 a concentração de Mg na folha foi igual entre os sistemas de adubação (0,8 e 2,1 g kg⁻¹, respectivamente). A outra interação (experimento x dose) ocorreu porque o modelo linear E1 para antecipação não foi significativo. Os modelos revelaram redução do Mg na folha de milho em razão da dose de potássio e as taxas foram 0,001, 0,002 e 0,008 g kg⁻¹ por unidade de K₂O em E1 (parcelamento), E2 e E3, respectivamente.

Figura 15. Concentração de potássio (a, b, c) e magnésio (d, e, f) na folha diagnóstica de milho em razão da dose de potássio (0, 60, 120 e 180 $kg\ ha^{-1}\ K_2O$) fornecida em sistema de adubação (parcelamento e antecipação) entre 2014-2015 em Pedro Afonso - E1 (a, e), 2015-2016 em Pedro Afonso - E2 (b, e) e 2015-2016 em Palmas - E3 (c, f). Linha contínua indica modelo para o parcelamento e linha pontilhada indica modelo para a antecipação de potássio. Os modelos lineares para a concentração de potássio são: E1 parcelamento $f(y) = 0,008x + 21,82$ ($R^2\ 0,33ns$); E1 antecipação $f(y) = 0,01x + 22,11$ ($R^2\ 0,66ns$); E2 parcelamento $f(y) = 0,006x + 26,03$ ($R^2\ 0,33ns$); E2 antecipação $f(y) = 0,01x + 26,25$ ($R^2\ 0,59ns$); E3 parcelamento $f(y) = 0,03x + 5,95$ ($R^2\ 0,73**$); E3 antecipação $f(y) = 0,02x + 7,78$ ($R^2\ 0,73*$). Os modelos lineares para a concentração de magnésio são: E1 parcelamento $f(y) = -0,001x + 0,94$ ($R^2\ 0,87*$); E1 antecipação $f(y) = -0,0008x + 1,13$ ($R^2\ 0,62ns$); E2 parcelamento $f(y) = -0,002x + 1,03$ ($R^2\ 0,99**$); E2 antecipação $f(y) = -0,002x + 0,96$ ($R^2\ 0,92**$); E3 parcelamento $f(y) = -0,009x + 3,02$ ($R^2\ 0,85**$); E3 antecipação $f(y) = -0,007x + 2,63$ ($R^2\ 0,86**$). ns não significativo; * significativo ($p < 0,5$); ** significativo ($p < 0,01$) pelo teste F.

2.3.2.3. Produtividade de grãos do milho

A produção de grãos de milho não diferiu para sistema de adubação e dose de potássio ($p > 0,05$) entre os experimentos 1 e 2 (Figura 16). A produtividade de grãos foi 7.733 kg ha^{-1} em média e o ajuste de modelo linear não foi significativo para o E1 (Figura 16a). No entanto, no E2 o milho que recebeu a dose K0 produziu 5.800 kg ha^{-1} de grãos, enquanto a dose K180 reduziu em 14% a produção de grãos (4.960 kg ha^{-1}) (Figura 16b). Neste mesmo local, o ajuste de modelo linear entre produção de grãos e dose foi significativo para cada sistema de adubação: parcelamento ($p < 0,01$) e antecipação ($p < 0,05$) de potássio (Figura 16b). A média entre os modelos de parcelamento e antecipação mostrou que a aplicação de uma unidade de potássio (K_2O) reduziu a produção de grãos em 4,6 quilogramas. A produção de grãos não exibiu interações entre experimento, sistemas de adubação e dose ($p > 0,05$).

Em geral, o milho do E1 produziu 33% mais grãos que E2, média entre sistema de adubação e doses de potássio. Nota-se que o índice pluviométrico durante o desenvolvimento do milho foi 17% inferior no E2 em comparação ao E1, além de receber 56% da precipitação no período até vinte dias após a semeadura (Figura 2). Ressalta-se que no E3 não houve produção de grãos em razão da redução no índice pluviométrico durante o desenvolvimento da cultura (Figura 2c).

Figura 16. Produtividade de grãos na cultura do milho em razão da dose de potássio (0, 60, 120 e 180 kg ha⁻¹ K₂O) fornecida em sistema de adubação (parcelamento e antecipação) entre 2014-2015 (a) e 2015-2016 (b) em Pedro Afonso. A safra de 2015-2016 em Palmas não produziu grãos. Linha contínua indica modelo para o parcelamento e linha pontilhada indica modelo para a antecipação de potássio. Os modelos lineares são: E1 parcelamento $f(y) = 0,57x + 7.697,3$ (R^2 0,01ns); E1 antecipação $f(y) = 1,60x + 7.572,9$ (R^2 0,62ns); E2 parcelamento $f(y) = -5,78x + 5.739,1$ (R^2 0,87**); E2 antecipação $f(y) = -3,43x + 5.517$ (R^2 0,59*). ns não significativo; * significativo ($p < 0,5$); ** significativo ($p < 0,01$) pelo teste F.

2.4. Discussão

2.4.1. Cultura da Soja

A cultura da soja raramente mostra efeito positivo na produtividade de grãos pela aplicação de potássio, apesar de aumentar o acúmulo deste nutriente (Borges e Mallarino, 2000; Clover e Mallarino, 2013; Fulford e Culman, 2018; Oltmans e Mallarino, 2015). Na mesma direção, apenas a soja conduzida no experimento 3 mostrou efeito positivo entre dose de potássio e produtividade de acordo com o ajuste do modelo linear (Figura 8). Na implantação deste experimento, o teor de potássio trocável foi $1,2 \text{ mmol} \cdot \text{dm}^{-3}$ para a camada de solo entre 0 e 0,2m de profundidade e teor menor ainda para as demais camadas de solo (Tabela 2). O que explica este fato é que segundo Rosolem e Nakagawa (2001) este teor de K trocável observado é o limite para a obtenção de pelo menos 90% da máxima produtividade de grãos da soja.

A concentração de potássio na folha diagnóstica da soja não diferiu para a dose de potássio, média entre experimentos, apesar de ajuste com modelo linear para o experimento 3 revelar aumento da concentração de K foliar em razão da dose de potássio. Este modelo indicou concentração de 18 g kg^{-1} de K na folha quando não houve aplicação de potássio. De acordo com Rosolem e Nakagawa (2001), a concentração limite de K na folha foi 15 g kg^{-1} para a obtenção de 90% da máxima produtividade de soja, enquanto que no estudo mais recente de Stammer e Mallarino (2018) observou-se faixa de concentração crítica que variou entre 16 e 20 g kg^{-1} para o potássio.

A aplicação de potássio reduziu em até 15% a concentração de Mg foliar, apesar de não reduzir a produtividade de grãos. Heenan e Campbell (1981) observaram efeito negativo no Mg absorvido pela soja quando aumentaram a concentração de K na solução nutritiva. Na mesma direção, o estudo de Moreira et al. (2015) demonstrou 33% de redução na concentração de Mg foliar, apesar de aumento de 40% na produtividade de grãos pela aplicação de potássio. No entanto, a concentração de Mg foliar foi maior que 3 g kg^{-1} na presente pesquisa, valor suficiente para atender as necessidades da cultura da soja como observado no estudo de Rosolem e Nakagawa (2001).

Os acúmulos de biomassa, potássio e magnésio pela cultura da soja não tiveram prejuízos em razão da aplicação de potássio, mesmo com maior acúmulo de potássio nas doses K72, K120 e K180 do experimento 1. Em geral, o acúmulo de K durante o início da fase vegetativa foi pouco intenso e acompanhou o acúmulo de biomassa, apesar de Borges e Mallarino (2000) observarem reposta da soja em estágio fenológico V5 para os acúmulos de biomassa e potássio em 7 e 27% dos locais, respectivamente. A soja em estágio fenológico R5.5 apresentou os maiores acúmulos de biomassa, K e Mg, e entre R2 e R5.5 a cultura apresentou rápido acúmulo de potássio em razão do aumento do crescimento e produção de biomassa, que também foi observado por Kolar e Grewal (1994). Segundo estes mesmos autores, as doses de até 90 kg ha^{-1} de K_2O aumentaram o acúmulo de potássio pelas plantas, enquanto que na presente pesquisa, apenas no experimento 1 as doses maiores que K72 ampliaram o acúmulo de potássio. A quantidade máxima acumulada de potássio pela soja nesta pesquisa foi semelhante aos resultados de Gaspar et al. (2017) que determinaram acúmulo de potássio de 130 kg ha^{-1} para produtividades de 3.600 kg ha^{-1} . O acúmulo de Mg pela soja foi semelhante entre os locais, por volta de 26 kg ha^{-1} no estágio fenológico de R5.5. No entanto, destaca-se que a soja no experimento 3 acumulou mais Mg frente ao menor acúmulo de biomassa, em comparação aos demais experimentos.

2.4.2. Cultura do Milho

Os acúmulos de biomassa e Mg no milho não diferiram pela antecipação de potássio na soja, enquanto o acúmulo de K aumentou 15% para a antecipação de K apenas no experimento 3, quando comparado ao parcelamento. Este maior acúmulo de K no milho para a antecipação indicou que a planta pode ter explorado camada de solo suficiente para aproveitar o K residual do solo após a colheita da soja, além do próprio K reciclado pela cultura da soja. Segundo Oltmans e Mallarino (2015), o potássio dos resíduos de soja retorna rapidamente ao solo após a colheita e aumenta o teor de K do solo.

Para as doses de potássio, o efeito foi positivo para o acúmulo de K no milho e negativo para o de Mg, enquanto que o acúmulo de biomassa mostrou resposta apenas no experimento 3. Heckman e Kamprath (1992) também observaram efeito positivo da aplicação de K no acúmulo de potássio no milho, apesar de ausência de efeito no acúmulo de biomassa. Na presente pesquisa observou-se máximo acúmulo de K no milho após os 55 dias de emergência das plantas (Figura 11) e este resultado foi similar aos obtidos por Heckman e Kamprath (1992) e Ciampitti et al. (2013). O efeito negativo das doses de K no acúmulo de Mg pelo milho resulta da interação obtida pelo aumento do teor de potássio no solo, além de inibição competitiva entre estes íons nos mecanismos de absorção da planta (Gransee e Fuhrs, 2013). Na presente pesquisa o acúmulo de Mg pelo milho no florescimento foi 56% do total, média entre os experimentos 1 e 2, enquanto Ciampitti e Vyn (2013) obtiveram resultado superior (77%) para milho safra.

A concentração de potássio na folha diagnóstica do milho não diferiu entre parcelamento ou antecipação de K, entretanto diferiu quanto às doses de potássio. A concentração de K na folha aumentou para todos os experimentos, apesar dos modelos ajustados para o E3 revelarem aumento intenso na concentração de K na folha, com variação de 6-11 g kg⁻¹. Isto se deve ao menor teor de K trocável do solo na implantação deste experimento, que resultou em concentrações de K na folha inferiores à faixa crítica de 11-14 g kg⁻¹ K obtidas por Stammer e Mallarino (2018). Crusciol et al. (2015) obtiveram 23-31 g kg⁻¹ de K foliar em milho safra que produziu 9-10 mil kg ha⁻¹ de grãos. Estes valores foram similares aos obtidos nos demais experimentos de milho segunda safra desta pesquisa.

O Mg foliar do milho não foi alterado pela antecipação de potássio na soja. Por outro lado, as doses de K reduziram a concentração de Mg foliar do milho, sem alterar a produtividade de grãos. Os resultados do efeito negativo das doses de K na concentração de Mg foliar do milho também foram observados por Bruns e Ebelhar (2006). Para Altarugio et al. (2017) e Crusciol et al. (2015), a concentração de Mg foliar no milho safra variou entre 2-3 g kg⁻¹ para produtividade de grãos entre 7-10 mil kg ha⁻¹ respectivamente, enquanto na presente pesquisa a concentração variou entre 0,8-1 g kg⁻¹ de Mg para produção de 6-8 mil kg ha⁻¹ de grãos. Isto estreita-se com o efeito negativo das doses de K no acúmulo de Mg, já explicado acima.

A produtividade de grãos do milho não diferiu para sistema de adubação e dose de potássio, mesmo com modelos lineares ajustados para o experimento 2 revelarem que a dose de potássio reduziu em até 14% a produtividade. Isto aponta para o início do efeito negativo da dose de potássio na produtividade do milho pela redução da nutrição de Mg na planta, como já detalhado acima. Além disso, o solo do experimento 2 apresentou saturação de Mg nos sítios de troca do solo (CTC) 33% inferior ao experimento 1, na época de implantação do experimento (Tabelas 1 e 2). Em geral, o que limitou a produtividade do milho foram outros fatores, como índice pluviométrico, acidez potencial e teor de Mg inicial do solo, do que o efeito de sistema de adubação e dose de

potássio. Portanto, não há necessidade de preconizar o parcelamento de potássio em solos corrigidos porque o incremento que a adubação de potássio proporciona é muito pequena em comparação a outros fatores.

2.5. Conclusão

O sistema de adubação não interfere em nutrição foliar e acúmulo de K e Mg da sucessão soja – milho segunda safra. Portanto, o parcelamento de potássio na sucessão soja – milho segunda safra não se justifica do ponto de vista fitotécnico. Não houve efeito negativo na produtividade da soja em razão da antecipação de potássio do milho, nem positivo no milho quando recebeu o potássio próximo à sua semeadura (parcelamento). Por isso, justifica-se ao produtor fazer a aplicação de potássio uma única vez para ganhar rendimento operacional durante a semeadura do milho, desde que os teores de K e Mg trocáveis do solo sejam maiores que 1 e 6 mmol_c dm⁻³, respectivamente.

Referências

- Altarugio, L.M., Loman, M.H., Nirschl, M.G., Silvano, R.G., Zavaschi, E., Carneiro, L.M.S., Vitti, G.C., Luz, P.H.C., Otto, R., 2017. Yield performance of soybean and corn subjected to magnesium foliar spray. *Pesq. agropec. bras.* 52, 1185-1191. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2017001200007>
- Alvares, C.A., Stape, J.L., Sentelhas, P.C., De Moraes Gonçalves, J.L., Sparovek, G., 2013. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorol. Zeitschrift* 22, 711–728. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- Borges, R., Mallarino, A.P., 2000. Grain yield, early growth, and nutrient uptake of no-till soybean as affected by phosphorus and potassium placement. *Agron. J.* 92, 380-388. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2014.04.016>
- Bruns, H.A., Ebelhar, M.W., 2006. Nutrient uptake of maize affected by nitrogen and potassium fertility in a humid subtropical environment. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 37, 275–293. <https://doi.org/10.1080/00103620500408829>
- Ciampitti, I.A., Vyn, T.J., 2013. Maize nutrient accumulation and partitioning in response to plant density and nitrogen rate: II. Calcium, magnesium, and micronutrients. *Agron. J.* 105, 1645-1657. <https://doi.org/10.2134/agronj2013.0126>
- Clover, M.W., Mallarino, A.P., 2013. Corn and soybean tissue potassium content responses to potassium fertilization and relationships with grain yield. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 77, 630–642. <https://doi.org/10.2136/sssaj2012.0223>
- CONAB, 2016a. Acomp. safra bras. grãos, v. 7- Safra 2015/16 - Sétimo levantamento.
- CONAB, 2016b. Acomp. safra bras. grãos, v. 12 Safra 2015/16 - Décimo Segundo levantamento.
- CQFS-RS/SC, 2004. Manual de adubação e de calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. Porto Alegre, Núcleo Regional Sul da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 404 p.
- EMBRAPA, 2006. Sistema brasileiro de classificação de solos. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos. 306 p.
- Fehr, W.R., Caviness, C.E., Burmood, D.T., Pennington, J.S., 1971. Stage of development descriptions for soybeans, *Glycine max* (L.) Merrill. *Crop Sci.* 11, 929–931. <https://doi.org/10.2135/cropsci1971.0011183X001100060051x>
- Fulford, A.M., Culman, S.W., 2018. Over-fertilization does not build soil test phosphorus and potassium in Ohio.

- Agron. J. 110, 56–65. <https://doi.org/10.2134/agronj2016.12.0701>
- Garcia, R.A., Ceccon, G., Sutier, G.A. da S., dos Santos, A.L.F., 2018. Soybean-corn succession according to seeding date. *Pesq. Agropec. Bras.* 53, 22–29. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2018000100003>
- Gaspar, A.P., Laboski, C.A.M., Naeve, S.L., Conley, S.P., 2017. Phosphorus and potassium uptake, partitioning, and removal across a wide range of soybean seed yield levels. *Crop Sci.* 57, 2193–2204. <https://doi.org/10.2135/cropsci2016.05.0378>
- Granssee, A., Fuhr, H., 2013. Magnesium mobility in soils as a challenge for soil and plant analysis, magnesium fertilization and root uptake under adverse growth conditions. *Plant Soil* 368, 5–21. <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1567-y>
- Heenan, D.P., Campbell, L.C., 1981. Influence of potassium and manganese on growth and uptake of magnesium by soybeans (*Glycine max* (L.) Merr. cv. Bragg). *Plant Soil* 61, 447–456. <https://doi.org/10.1007/BF02182025>
- Heckman, J.R., Kamprath, E.J., 1992. Potassium accumulation and corn yield related to potassium fertilizer rate and placement. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56, 141–148. <https://doi.org/10.2136/sssaj1992.03615995005600010022x>
- Kolar, J.S., Grewal, H.S., 1994. Effect of split application of potassium on growth, yield and potassium accumulation by soybean. *Fertil. Res.* 39, 217–222. <https://doi.org/10.1007/BF00750249>
- Moreira, A., Moraes, L.A.C., Fageria, N.K., 2015. Variability on Yield , Nutritional Status , Soil Fertility , and Potassium-Use Efficiency by Soybean Cultivar in Acidic Soil Variability on Yield , Nutritional Status , Soil Fertility , and Potassium-Use Efficiency by Soybean Cultivar in Acidic Soil. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 46, 2490–2508. <https://doi.org/10.1080/00103624.2015.1085555>
- Oltmans, R.R., Mallarino, A.P., 2015. Potassium uptake by corn and soybean, recycling to soil, and impact on soil test potassium. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 79, 314–327. <https://doi.org/10.2136/sssaj2014.07.0272>
- Parvej, M.R., Slaton, N.A., Purcell, L.C., Roberts, T.L., 2015. Potassium fertility effects yield components and seed potassium concentration of determinate and indeterminate soybean. *Agron. J.* 107, 943–950. <https://doi.org/10.2134/agronj14.0464>
- Qiu, S., Xie, J., Zhao, S., Xu, X., Hou, Y., Wang, X., Zhou, W., He, P., Johnston, A.M., Christie, P., Jin, J., 2014. Long-term effects of potassium fertilization on yield, efficiency, and soil fertility status in a rain-fed maize system in northeast China. *F. Crop. Res.* 163, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2014.04.016>
- Raij, B.V., Andrade, J.C., Cantarella, H., Quaggio, J.A., 2001. *Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais*. Campinas: Instituto Agronômico. 285 p.
- Ritchie, S., Hanway, J., Thompson, H., 1986. How a soybean plant develops. *Iowa State Univ. Sci. Technol. Coop. Ext. Serv.* 21.
- Rosolem, C.A., Nakagawa, J., 2001. Residual and annual potassic fertilization for soybeans. *Nutr. Cycl. Agroecosystems* 59, 143–149. <https://doi.org/10.1023/A:1017555023168>
- Rosolem, C.A., Steiner, F., 2017. Effects of soil texture and rates of K input on potassium balance in tropical soil. *Eur. J. Soil Sci.* 68, 658–666. <https://doi.org/10.1111/ejss.12460>
- Stammer, A.J., Mallarino, A.P., 2018. Plant tissue analysis to assess phosphorus and potassium nutritional status of corn and soybean. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 82, 260–270. <https://doi.org/10.2136/sssaj2017.06.0179>
- Tezotto, T., Favarin, J., Neto, A.P., 2013. Simple procedure for nutrient analysis of coffee plant with energy dispersive X-ray fluorescence spectrometry (EDXRF). *Sci. Agrícola* 70, 263–267. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162013000400007>

3. EFEITO DO SISTEMA DE ADUBAÇÃO E DOSES DE POTÁSSIO NA RECUPERAÇÃO DE POTÁSSIO DO FERTILIZANTE PELA SUCESSÃO SOJA – MILHO SEGUNDA SAFRA

Resumo

A antecipação de potássio (K) do milho segunda safra na cultura da soja é um sistema de adubação que pode apresentar aproveitamento do K-fertilizante pela sucessão soja – milho similar ao parcelamento de potássio para cada cultura. A antecipação do K de base e cobertura do milho na cultura da soja são facilitados pela aplicação a lanço e por reduzir o tempo de reabastecimento da semeadora durante o plantio. Isto permite rápida semeadura do milho segunda safra para garantir seu desenvolvimento no período final de chuvas na região de Cerrado. O objetivo foi avaliar o aproveitamento (acúmulo e recuperação) de potássio do fertilizante e o desempenho da sucessão soja – milho em razão de sistemas de adubação e doses de potássio. O estudo foi feito em Pedro Afonso 2014/2015, Pedro Afonso 2015/2016 e Palmas 2015/2016, no estado do Tocantins. Os tratamentos consistiram nas doses 0, 60, 120 e 180 kg ha⁻¹ de K₂O aplicadas a lanço em parcelamento (40% da dose na cultura da soja e 60% na cultura milho) e antecipação no plantio da soja. Avaliou-se o desempenho da sucessão pela produção de biomassa e grãos, e o acúmulo de potássio pela biomassa e nos grãos. Determinou-se ainda, por meio de rubídio, o aproveitamento (acúmulo e recuperação) de potássio proveniente do fertilizante na sucessão de culturas. Os resultados mostraram que antecipação de potássio não alterou o desempenho das culturas de soja e milho, com exceção ao acúmulo de K pelo milho. A recuperação de potássio do fertilizante para cada cultura foi ~30%, enquanto para a sucessão foi 52%. O aproveitamento de K-fertilizante pela sucessão soja-milho foi similar e até superior (22%) para a antecipação de potássio. Portanto, a antecipação de potássio como sistema de adubação é viável.

Palavras-chave: Traçador rubídio; Potássio absorvido do fertilizante; Adubação antecipada

Abstract

Transfer corn potassium (K) fertilizer to soybean in the soybean – corn succession is the early application practice to avoid stops during the corn sowing by filling planter with fertilizer. After soybean harvest, corn sowing requires quick actions to explore the final period of rainy season in the Cerrado's region. So, this chapter aimed to compare rates of potassium supplied at two practices (early and split application for each crop) for recovery of potassium from fertilizer and performance for soybean – corn at the same crop season. This research was conducted in Pedro Afonso 2014/2015, Pedro Afonso 2015/2016 and Palmas 2015/2016 – Tocantins State, Brazil. Potassium rates was 0, 60, 120 e 180 kg ha⁻¹ K₂O. Evaluations were performance for biomass and grains, and potassium accumulated in aboveground biomass and grains. K-fertilizer accumulation and recovery by crops was also evaluated with rubidium as K tracer. Results for early application does not change performance of soybean and corn, except for K accumulation by corn. K recovery from fertilizer was ~30% for each crop and 52% for succession. Early application was similar or 22% higher than split application for succession. Therefore, K early application can be practicable by farmers.

Keywords: Rubidium tracer; Potassium uptake from fertilizer; Early application

3.1. Introdução

A sucessão entre soja – milho durante a mesma safra é comum na maior parte das áreas agrícolas da região de Cerrado e pode ser confirmada no estudo de Rodrigues et al. (2016). O clima característico desta região é de chuva entre primavera-verão, estiagem no outono e seca no inverno (Alvares et al., 2013). Por isso, durante o período de chuvas as atividades de semeadura e colheita da soja, seguida do plantio de milho, são feitas com agilidade. No Tocantins a semeadura do primeiro cultivo (soja) ocorre em outubro-novembro, com colheita em fevereiro, e ao mesmo tempo ocorre a semeadura do segundo cultivo (milho). E a colheita do milho é feita em maio-junho no período sem chuvas.

A agilidade na implantação da sucessão soja – milho é obtida ainda pela antecipação do potássio do milho na cultura da soja por meio da redução do número de paradas da semeadora para reabastecimento com fertilizantes. A aplicação antecipada de potássio pode ser observada no outono antes do período de neve (Oltmans e Mallarino, 2015). A adubação antecipada na sucessão soja – milho aumenta a dose de K no primeiro cultivo, e segundo Clover e Mallarino (2013) e Oltmans e Mallarino (2015) o acúmulo de K na parte aérea da soja responde com maior frequência que os grãos (consumo de luxo). A reciclagem de K dos resíduos de colheita da soja para o solo é rápida, após dois meses restam nos resíduos apenas 20% do K (Oltmans e Mallarino, 2015), que pode coincidir até o florescimento, período de maior demanda da cultura do milho (Ciampitti et al., 2013). No entanto, não se conhece a recuperação de potássio do fertilizante antecipado pela sucessão soja – milho.

A recuperação aparente de potássio do fertilizante pela planta pode ser obtida pela diferença entre acúmulo de K entre tratamento com e outro sem fornecimento de K, como demonstrado por Dobermann (2007) e Niu et al. (2011). Baligar e Bennett (1986ab) e Baligar et al. (2001) revisaram a literatura e reportaram recuperação de potássio do fertilizante variou entre 20% e 40%, em diversos solos da região tropical, como nos Latossolos do Brasil Central. A recuperação de potássio do fertilizante variou entre 31% e 62% em situações de monocultivos e de rotação, respectivamente (Blake et al., 1999). Em solo de textura arenosa, Kolar e Grewal (1994) conduziram durante três anos a cultura da soja e obtiveram recuperação entre 30% e 58% em razão do parcelamento e da dose de K. O milho em pós-antese recuperou 32% de potássio do fertilizante no trabalho de Duivenbooden et al. (1996) e o milho na colheita recuperou entre 18% e 30% no manuscrito de Niu et al. (2011). No entanto, a adição de potássio fertilizante, semelhante ao que ocorre com o nitrogênio, pode favorecer a absorção de potássio do fertilizante sobre o K-trocável do solo nos tratamentos adubados com K (Yao et al., 2003).

A avaliação da recuperação de potássio do fertilizante pode ser obtida por meio do traçador de potássio – rubídio (Rb), com a pressuposição de que K e Rb distribuem-se entre os componentes do solo e são absorvidos pelas plantas em mesma relação do que foi adicionado ao fertilizante (Yao et al., 2003). O Rb também tem sido utilizado em investigações de solo e planta (Buxbaum et al., 2001; Deist e Talibudeen, 1967; Kuhlmann, 1990; Murphy et al., 1955; Rosolem e Pivetta, 2017; Silva et al., 2011; Walker e Barber, 1962). A recuperação obtida com Rb variou entre 19-54% (Murphy et al., 1955) e 20-40% (Hafez e Stout, 1973), enquanto Yao et al. (2003) recuperaram entre 61-77% após três cultivos de 40 dias, média entre 20-26% por cultivo.

A hipótese deste capítulo é de similaridade na recuperação de potássio do fertilizante pela sucessão soja – milho entre os sistemas de adubação (parcelado e antecipado), sem prejuízos ao desempenho das culturas. O objetivo foi avaliar o aproveitamento (acúmulo e recuperação) de potássio do fertilizante e o desempenho da sucessão em razão de sistemas de adubação e doses de potássio.

3.2. Material e Métodos

3.2.1. Descrição dos Locais/Anos

A condução dos cultivos de soja e milho segunda safra foi no Estado do Tocantins em três locais/anos (LA). O primeiro local/ano (LA1) foi implantado no município de Pedro Afonso (9°06'00.9"S 48°08'33.1"W, com 324 metros de elevação) entre os anos de 2014/2015, o segundo (LA2) foi ao lado de LA1 (9°06'01.4"S 48°08'37.7"W) entre os anos de 2015/2016 e o terceiro (LA3), também entre 2015/2016, na estação experimental da Universidade Estadual do Tocantins no município de Palmas (10°23'59.6"S 48°21'49.9"W, com 215 metros de elevação). Um breve histórico de culturas e manejo destas áreas estão descritos no capítulo anterior.

O clima nestes locais é classificado como Aw (Koeppen) – clima tropical de verão chuvoso (dezembro e fevereiro) e inverno seco (maio e setembro). A Figura 2 do capítulo anterior mostra o índice pluviométrico e a temperatura média por decêndio para os três locais do estudo. O índice pluviométrico em Palmas (LA3) foi menor e com distribuição desuniforme em comparação à de Pedro Afonso (LA1 e LA2) (Figura 2, capítulo anterior). O desenvolvimento da cultura da soja em LA1 contou com 825 mm de precipitação até a colheita, dos quais 150 mm (18% do total) foram concentrados no terceiro decêndio de novembro e 165 mm (20% do total) foram entre os estádios fenológicos R6 (coleta de planta inteira) e R8 (colheita de grãos). Ainda no LA1, o milho cultivado em sucessão recebeu somente 504 mm de precipitação do primeiro decêndio de março até o segundo decêndio de maio e a chuva. A chuva no milho se concentrou nos períodos de estabelecimento inicial e desenvolvimento vegetativo, não houve precipitação durante o mês anterior à colheita. A soja conduzida em LA2 contou com 806 mm de chuva, 47% dela durante o mês de janeiro (~300 mm em 20 dias), e somente 50 mm em fevereiro entre os estádios R6 e R8. O milho conduzido em sucessão recebeu 420 mm de precipitação, dos quais 56% ocorreu nos vinte dias após a semeadura do milho. A soja cultivada em LA3 contou com 656 mm de chuva, sendo 80% concentrada no mês de janeiro e entre os estádios R6 e R8 não choveu. Para este mesmo local choveu apenas 112 mm em todo o período de desenvolvimento da cultura do milho, dos quais 76% desse volume concentrado nos primeiros 50 dias. O milho cultivado no ano de 2016 recebeu precipitação de 25 mm em LA3 e 34 mm em LA2 antes da colheita.

A análise granulométrica do solo revelou 53, 52 e 35% de argila, 17, 19 e 5% de silte, e 30, 29 e 60% de areia para LA1, LA2 e LA3, respectivamente. A análise química das camadas de solo foi feita de amostragem prévia à implantação dos experimentos e os resultados são apresentados nas Tabelas 1 e 2 do capítulo anterior. O teor de potássio trocável foi 3.9, 1.5 e 1.2 mmol dm⁻³ para LA1, LA2 e LA3, respectivamente.

3.2.2. Delineamento e Campo Experimental

O delineamento experimental foi de blocos ao acaso com quatro repetições para os três LA. Os tratamentos consistiram em doses 0 (K0), 60 (K60), 120 (K120) e 180 (K180) kg ha⁻¹ de K₂O (KCl) fornecidas a lanço na sucessão soja (*Glycine max* L.) – milho (*Zea mays* L.) por meio de dois sistemas de adubação: SA1 (parcelamento) – aplicação de 40% da dose na cultura da soja e 60% na cultura milho, e SA2 (antecipação) – dose aplicada uma única vez, na cultura da soja (Tabela 3, capítulo anterior). Já o delineamento experimental para a cultura da soja foi de sete doses de K₂O em blocos ao acaso com quatro repetições: 0 (K0), 24 (K24), 48 (K48), 60 (K60), 72

(K72), 120 (K120) e 180 (K180) kg ha⁻¹ (Tabela 3, capítulo anterior). As medidas utilizadas em K0 foram obtidas da média entre os tratamentos-controle. A aplicação do potássio foi sempre aos seis dias após a semeadura.

As parcelas continham 11 fileiras de plantas de 10m de comprimento e espaçadas a meio metro. A soja foi semeada no quinto dia do mês de novembro em LA1 e LA2, enquanto no LA3 foi dia 26 de novembro. A cultivar utilizada foi a ST820RR com populações de plantas de 423, 396 e 227 mil ha⁻¹ para LA1, LA2 e LA3, respectivamente.

O rubídio (Rb) foi utilizado como traçador de potássio do fertilizante para avaliar o aproveitamento (acúmulo e recuperação) de potássio do fertilizante (Yao et al., 2003). A aplicação de Rb foi feita sempre após à aplicação de potássio. A fonte cloreto de rubídio (RbCl) foi diluída em 5 litros de água e aplicada com regador em faixa demarcada (microparcela) de 1m entre as fileiras de plantas 4 e 8 no centro da parcela. Dez por cento de RbCl foi adicionado ao KCl e as aplicações foram feitas conforme a dose de potássio e o sistema de adubação (Tabela 3, capítulo anterior).

A produção de biomassa (PB) e o acúmulo de potássio na biomassa (AKB) na soja foi obtida da coleta de 6 plantas do centro da fileira 5 em estágio fenológico de R6 (Fehr et al., 1971), antes do início da queda de folhas por senescência, no máximo acúmulo de K pela planta (Gaspar et al., 2017). A coleta descrita foi feita em fevereiro, no 3º dia para LA1 (2015) e LA2 (2016), e no 29º para LA3 (2016). A PB e o AKB incluíram dados de raízes que foram obtidas da coleta de 3 daquelas plantas de soja. A coleta de raízes foi com trado de 0,2m de profundidade por 0,145m de diâmetro e foram separadas do solo em peneira de malha 1 mm e água corrente.

A produção de grãos (PG) e o acúmulo de potássio nos grãos (AKG) da soja foram obtidos da trilha de plantas das fileiras 6, 7 e 8 em estágio R8. Os resíduos desta trilha foram devolvidos e distribuídos sobre a área entre as fileiras da área coletada para avaliação de grãos, simulando a colheita. A colheita da soja foi realizada em 28 de fevereiro no LA1 (2015), em 25 de fevereiro no LA2 (2016) e em 11 de março no LA3 (2016).

O milho foi semeado no dia primeiro de março de 2015 no LA1, 26 de fevereiro de 2016 no LA2 e 15 de março de 2016 no LA3. O híbrido de milho utilizado no LA1 foi o Syngenta Impacto, enquanto no LA2 e LA3 foi o LG6304. As populações do milho foram de 58, 48 e 55 mil plantas ha⁻¹ para LA1, LA2 e LA3, respectivamente. Esta cultura também recebeu as doses de potássio (Tabela 3, capítulo anterior) e rubídio aos seis dias após a semeadura. A faixa entre as fileiras 6, 7 e 8 recebeu Rb dissolvido em 2,5 litros de água, com a mesma porcentagem de adição do traçador que a soja. O milho recebeu 120 kg ha⁻¹ N-ureia a lanço no estágio vegetativo de quatro folhas em todos os locais/anos. A colheita do milho foi realizada em junho, dia 25 no LA1 (2015), dia 30 no LA2 (2016) e dia 16 no LA3 (2016). Três plantas de milho na área central da fileira 7 foram coletadas em maturação fisiológica para avaliação da parte aérea e grãos. Uma destas plantas teve suas raízes avaliadas com trado, como descrito acima na cultura da soja. A PB e o AKB no milho foram obtidos de parte aérea, grãos e raízes, e dos grãos foram obtidos a PG e o AKG de milho.

A sucessão soja – milho recebeu 80 e 118 kg ha⁻¹ de P₂O₅ em LA1 e LA2 respectivamente, a lanço no mês de setembro, antes da semeadura da soja. No LA3, o fósforo foi aplicado no sulco de semeadura e a dose foi de 91 e 125 kg ha⁻¹ de P₂O₅ para as culturas da soja e do milho, respectivamente. O fósforo foi fornecido como superfosfato simples.

As produções de biomassa entre soja e milho foram adicionadas para se obter o valor de produção de biomassa da sucessão (soja + milho) de acordo com LA, sistema de adubação e dose de potássio. Assim também foi feito para a produção de grãos e os acúmulos de biomassa e grãos.

O acúmulo de potássio na cultura proveniente do fertilizante (AKCPF) foi determinado pela equação 1:

$$AKCPF = (Rb_f - Rb_n) \times (K / Rb) \quad (1)$$

AKCPF é o acúmulo de potássio pela cultura proveniente do fertilizante, kg ha⁻¹; C = soja (S); milho (M); ou soja – milho (SM); Rb_f é a quantidade de rubídio nas plantas (parte aérea, grãos e raízes) coletadas nas fileiras 5 e/ou 7 que receberam o traçador (fertilizante), kg ha⁻¹; Rb_n é a quantidade de rubídio nas plantas que não receberam o traçador (natural), kg ha⁻¹; K/Rb é a relação entre a quantidade de potássio e rubídio fornecidos (fertilizante) em semeadura (7,48).

A recuperação de potássio do fertilizante pela cultura (RKC) seguiu a equação 2:

$$RKC = [AKCPF / (K + Rb)] \times 100 \quad (2)$$

RKC é a recuperação de potássio do fertilizante pela cultura, em porcentagem; C = soja (S); milho (M); ou soja – milho (SM); AKCPF é o acúmulo de potássio pela cultura proveniente do fertilizante, obtido pela equação 1, em kg ha⁻¹; K + Rb é a soma de potássio e rubídio fornecidos, kg ha⁻¹.

Os resultados de AKCPF e RKC para a cultura do milho (M) e a sucessão soja – milho (SM) foram dispostos com o desconto de Rb exportado pelos grãos de soja. Portanto, isto representa a realidade obtida à campo, quando ocorre a colheita dos grãos na cultura da soja.

Todo material vegetal foi avaliado seco após período em estufa a 65 °C até peso constante. Os teores de K e Rb no tecido vegetal foram determinados por energia dispersiva de fluorescência de raio-X (Shimadzu EDX-720, Japão). As condições operacionais da determinação foram: colimador - 10 mm, atmosfera - ar, tensão no tubo de 15 kV (K) e 50 kV (Rb), corrente no tubo de 1 mA, tempo de irradiação - 100 s.

3.2.3. Análise Estatística

O conjunto de dados foram analisados no programa “Statistical Analysis System”, versão 9.2 (SAS Institute Inc., 2009). Os pressupostos de normalidade do erro e homogeneidade da variância foram testados por PROC UNIVARIATE (Shapiro Wilk) e PROC TRANSREG (Box-Cox), respectivamente. Caso a variável observada não atendesse os pré-requisitos da ANOVA, ela foi transformada de acordo com o lambda conveniente. A análise da variância dos dados de soja foi feita pelo GLM PROC considerando os efeitos fixos de locais/anos, doses de potássio e interações. A mesma análise foi aplicada as variáveis de milho e sucessão soja – milho, porém adicionados o efeito fixo de sistema de adubação e suas interações. Foram considerados efeitos significativos quando a probabilidade do teste F fosse de erro menor que 5%. Quando tratava-se de variáveis contínuas foi ajustada regressão linear por meio de PROC REG, e os parâmetros dos modelos comparados com auxílio do intervalo de confiança. Quando tratava-se de variáveis discretas, as médias foram separadas por LSD a 5% de probabilidade.

3.3. Resultados

3.3.1. Soja

As doses de potássio não interferiram em produção de biomassa (PB), acúmulo de potássio na biomassa (AKB), produção de grãos (PG) e acúmulo de potássio nos grãos (AKG) da soja, embora apresentaram efeito significativo para LA (Tabela 4). A PB média foi, em ordem decrescente, 8.372, 7.534 e 6.742 kg ha⁻¹ em LA2, LA1 e LA3, respectivamente. A PB variou entre 5.527 e 9.165 kg ha⁻¹ entre LA. O AKB médio entre as doses de fertilizante aplicada foi 121 kg ha⁻¹ em LA1, 144 kg ha⁻¹ em LA2 e 59 kg ha⁻¹ em LA3. A PG foi 2.924 kg ha⁻¹ em LA1, 3.087 kg ha⁻¹ em LA2 e 1.941 kg ha⁻¹ em LA3, que ressalta a ausência de resposta aos níveis de potássio. E finalmente o AKG variou entre 23 e 68 kg ha⁻¹, sendo a média maior em LA1 (63 kg ha⁻¹), do que LA2 (58 kg ha⁻¹) e LA3 (29 kg ha⁻¹). Não houve interação entre local/ano e dose em todos os parâmetros de desempenho da soja. No início do ciclo da soja de LA3 ocorreu ataque de lagarta-elasma (*Elasmopalpus lignosellus*) (Lepidoptera: Pyralidae).

Tabela 4. Produção de biomassa (PB), acúmulo de potássio na biomassa (AKB), produção de grãos (PG) e acúmulo de potássio nos grãos (AKG) da cultura da soja em razão de doses de potássio em Pedro Afonso 2015 (LA1), Pedro Afonso 2016 (LA2) e Palmas 2016 (LA3).

Local/Ano (LA)	Dose de K ₂ O (D)	PB	AKB kg ha ⁻¹	PG	AKG
1	0	7.237	106	2.836	61
	24	8.070	123	2.915	65
	48	7.384	122	2.888	63
	60	7.574	118	3.066	64
	72	7.665	136	2.935	65
	120	7.028	109	2.990	63
	180	7.779	133	2.835	61
Média LA1		7.534B	121B	2.924B	63A
2	0	8.226	129	3.169	60
	24	7.926	142	3.055	60
	48	8.031	134	3.467	68
	60	9.106	156	2.957	57
	72	7.935	149	3.210	58
	120	8.218	143	3.022	55
	180	9.165	155	2.731	52
Média LA2		8.372A	144A	3.087A	58B
3	0	6.287	47	1.841	29
	24	5.527	40	1.811	23
	48	8.012	64	2.156	27
	60	6.671	54	2.167	35
	72	5.720	46	1.894	30
	120	7.631	79	1.885	30
	180	7.350	87	1.830	30
Média LA3		6.742C	59C	1.941C	29C
Pr > F	LA	0,0036**	< 0,0001***	< 0,0001***	< 0,0001***
	D	0,7536 ^{ns}	0,0834 ^{ns}	0,2454 ^{ns}	0,6781 ^{ns}
	LA x D	0,8357 ^{ns}	0,6862 ^{ns}	0,7043 ^{ns}	0,2299 ^{ns}
CV%		22,97	19,12	27,19	13,14

ns não significativo; ** significativo até 1% de probabilidade; *** significativo até 0,1% de probabilidade de erro pelo teste F. Letras maiúsculas comparam as médias entre local/ano.

A relação entre dose e acúmulo de potássio na soja proveniente do fertilizante (AKSPF) foi significativa ($p < 0,001$), com comportamento linear e diretamente proporcional (Figura 17). A média entre as taxas de acúmulo para AKSPF de LA1, LA2 e LA3 foi 0,22 kg de K por unidade de K_2O . Não houve significância para a interação entre locais e doses de potássio ($p > 0,05$). Os modelos lineares ajustados em cada um dos LA mostraram coeficiente de determinação superiores a 0,93. A cultura da soja acumulou média de 9,7 kg ha^{-1} para a dose K24, enquanto que na dose K180 o acúmulo foi igual a 44 kg ha^{-1} .

Figura 17. Acúmulo de potássio na soja proveniente do fertilizante (AKSPF) em razão de doses de K_2O em Pedro Afonso 2015 (LA1), Pedro Afonso 2016 (LA2) e Palmas 2016 (LA3). As barras verticais indicam o erro padrão de quatro observações. Os modelos lineares são: LA1 $f(y) = 0,31x + 4,43$ (R^2 0,99***); LA2 $f(y) = 0,19x + 6,61$ (R^2 0,93***); LA3 $f(y) = 0,16x + 2,28$ (R^2 0,93***). *** significativo até 0,1% de probabilidade de erro pelo teste F.

A recuperação de potássio proveniente do fertilizante pela soja (RKS) não diferiu entre as doses de potássio fornecidas ($p > 0,05$), com média igual a 30%. A RKS diferiu apenas para LA ($p < 0,001$): em ordem decrescente, LA1 (41%) > LA2 (29%) > LA3 (20%) (Figura 18). Não houve interação entre LA e dose para RKS ($p > 0,05$).

Figura 18. Recuperação de potássio do fertilizante pela soja (RKS) em Pedro Afonso 2015 (LA1), Pedro Afonso 2016 (LA2) e Palmas 2016 (LA3). As barras verticais indicam o erro padrão de quatro observações.

3.3.2. Milho

Os sistemas de adubação e as doses de potássio não interferiram em PB, PG e AKG de milho (Tabela 5). A PB, PG e o AKG diferiram apenas para LA ($p < 0,001$). A PB foi maior no LA1 (18.091 kg ha⁻¹) do que LA2 (13.000 kg ha⁻¹) e LA3 (3.475 kg ha⁻¹). A PB variou entre 15.989-19.797 kg ha⁻¹ em LA1, 10.527-15.504 kg ha⁻¹ LA2 e 2.500-4.313 kg ha⁻¹ em LA3. A PG foi 7.724 kg ha⁻¹ em LA1, 5.870 kg ha⁻¹ em LA2 e não houve produção de grãos em LA3. O AKG foi 16 kg ha⁻¹ em LA1 e 11 kg ha⁻¹ em LA2. A dose de potássio aumentou o AKB no milho ($p < 0,001$). O AKB, média entre experimento e sistema de adubação, foi 101, 116, 116 e 141 kg ha⁻¹ de acordo com a dose K0, K60, K120 e K180, respectivamente.

Tabela 5. Produção de biomassa (PB), acúmulo de potássio na biomassa (AKB), produção de grãos (PG) e acúmulo de potássio nos grãos (AKG) da cultura do milho vs. doses de K₂O (D) fornecidas em sistemas de adubação (SA) para soja e milho (SA1) ou apenas na soja (SA2) em Pedro Afonso 2015 (LA1), Pedro Afonso 2016 (LA2) e Palmas 2016 (LA3).

SA	D	LA1				LA2				LA3			
		PB	AKB	PG	AKG	PB	AKB	PG	AKG	PB	AKB	PG ^a	AKG ^a
	kg ha ⁻¹												
SA1	0	19.797	152	8.628	18	12.128	132	5.630	10	4.313	18	-	-
	60	15.989	141	6.908	15	13.385	164	5.940	13	2.500	9	-	-
	120	17.205	181	7.514	15	12.486	133	5.518	11	4.154	21	-	-
	180	18.179	244	7.756	16	12.204	142	5.112	9	3.448	25	-	-
Média		17.793	179	7.702	16	12.551	143	5.550	11	3.604	18	-	-
SA2	0	17.779	160	7.376	17	13.520	129	6.391	13	3.659	15	-	-
	60	18.778	194	8.147	16	14.248	181	6.445	13	2.781	9	-	-
	120	19.147	207	8.228	16	10.527	127	4.760	8	3.809	26	-	-
	180	17.854	207	7.233	15	15.504	198	7.167	14	3.241	28	-	-
Média		18.390	192	7.746	16	13.449	159	6.191	12	3.372	20	-	-
Média SA		18.091A	186A	7.724A	16A	13.000B	151B	5.870B	11B	3.475C	19C	-	-
Pr > F													
		PB			AKB			PG			AKG		
LA		< 0,0001***			< 0,0001***			< 0,0001***			< 0,0001***		
SA		0,5000 ^{ns}			0,3413 ^{ns}			0,2871 ^{ns}			0,5907 ^{ns}		
D		0,4833 ^{ns}			0,0009**			0,7255 ^{ns}			0,4703 ^{ns}		
LA x SA		0,5508 ^{ns}			0,8431 ^{ns}			0,3533 ^{ns}			0,5211 ^{ns}		
LA x D		0,1248 ^{ns}			0,1561 ^{ns}			0,3675 ^{ns}			0,3040 ^{ns}		
SA x D		0,5385 ^{ns}			0,8459 ^{ns}			0,5143 ^{ns}			0,7998 ^{ns}		
LA x SA x D		0,3427 ^{ns}			0,7588 ^{ns}			0,0739 ^{ns}			0,1217 ^{ns}		
CV%		10,51			9,39			18,70			25,35		

ns não significativo; ** significativo até 1% de probabilidade; *** significativo até 0,1% de probabilidade de erro pelo teste F. a dados não disponíveis. Letras maiúsculas comparam as médias entre local/ano.

Modelos lineares e diretamente proporcionais foram ajustados para o AKB em LA1SA1 e LA3SA2, mesmo sem diferença entre os sistemas de adubação (Figura 19). O AKB foi 132 kg ha⁻¹ em LA1SA1 e 11 kg ha⁻¹ em LA3SA2 para K0, enquanto que na dose K180, o AKB foi 227 kg ha⁻¹ em LA1SA1 e 28 kg ha⁻¹ em LA3SA2. A dose K180 aumentou o AKB em 42% para LA1SA1 e 61% para LA3SA2 comparado ao K0. O AKB não foi alterado pela dose em LA1SA2, LA2SA1, LA2SA2 e LA3SA1, os valores de acúmulo foram 192, 143, 159 e 18 kg ha⁻¹, respectivamente.

Figura 19. Acúmulo de potássio na biomassa (AKB) de milho vs. doses de K₂O fornecidas para soja e milho (SA1) ou apenas na soja (SA2) em Pedro Afonso 2015 (LA1), Pedro Afonso 2016 (LA2) e Palmas 2016 (LA3). As barras verticais indicam o erro padrão de quatro observações. Os modelos são: LA1SA1 $f(y) = 0,53x + 132$ ($R^2 = 0,78^{**}$) círculo preenchido e linha contínua; LA3SA2 $f(y) = 0,10x + 10,88$ ($R^2 = 0,67^*$) triângulo vazio e linha pontilhada. * significativo a 5% de probabilidade; ** significativo a 1% de probabilidade de erro pelo teste F.

Houve interação significativa entre LA e SA para acúmulo de potássio no milho proveniente do fertilizante (AKMPF, $p < 0,01$). A interação ocorreu porque a média de AKMPF do SA1 foi maior que SA2 em LA1 ($p < 0,01$), enquanto que os SA foram iguais em LA2 e LA3 ($p > 0,05$). A média para o AKMPF no SA1 foi 79 kg ha⁻¹ e no SA2 foi 61 kg ha⁻¹ em LA1, enquanto a média entre os SA foi 32 kg ha⁻¹ em LA2 e 8 kg ha⁻¹ em LA3. A interação LA x SA para AKMPF também foi representada por meio de modelos lineares e diretamente proporcionais (Figura 20), dos quais apenas LA2SA1 não foi significativo. Outra interação para AKMPF ocorreu entre LA e dose ($p < 0,001$). Esta interação ocorreu porque as doses K120 e K180 apresentaram o mesmo AKMPF para o LA2 e LA3, enquanto o AKMPF em LA1 aumentou 45 e 67% para estas mesmas doses, respectivamente. O AKMPF para a dose K60 em LA1 foi igual (37 kg ha⁻¹) ao K120 e K180 do LA2 ($p > 0,05$). O AKMPF para a dose K120 e K180 também foi igual ($p > 0,05$) em LA2 (37 kg ha⁻¹) e LA3 (11 kg ha⁻¹). O AKMPF em LA1SA1, LA1SA2, LA2SA2, LA3SA1 e LA3SA2 apresentaram comportamento linear e diretamente proporcional (Figura 20). A taxa de acúmulo foi 0,76, 0,43, 0,24, 0,05 e 0,11 kg de K por kg de K₂O para LA1SA1, LA1SA2, LA2SA2, LA3SA1 e LA3SA2 respectivamente. Com base no intervalo de confiança dos modelos, as taxas de AKMPF foram iguais para LA1SA1 e LA1SA2, mas LA1SA1 foi maior que LA2SA2, LA3SA1 e LA3SA2. O AKMPF para o modelo LA1SA1 variou entre 33 e 124 kg ha⁻¹.

Figura 20. Acúmulo de potássio no milho proveniente do fertilizante (AKMPF) vs. doses de K_2O fornecidas para soja e milho (SA1) ou apenas na soja (SA2) em Pedro Afonso 2015 (LA1), Pedro Afonso 2016 (LA2) e Palmas 2016 (LA3). As barras verticais indicam o erro padrão de quatro observações. Os modelos são: LA1SA1 $f(y) = 0,76x - 12,71$ (R^2 0,99***) círculo preenchido e linha contínua; LA1SA2 $f(y) = 0,43x + 8,94$ (R^2 0,98***) círculo vazio e linha pontilhada; LA2SA1 $f(y) = 0,09x + 17,07$ (R^2 0,92ns) quadrado preenchido e linha contínua; LA2SA2 $f(y) = 0,24x + 6,61$ (R^2 0,99***) quadrado vazio e linha pontilhada; LA3SA1 $f(y) = 0,05x + 0,09$ (R^2 0,86*) triângulo preenchido e linha contínua; LA3SA2 $f(y) = 0,11x - 3,41$ (R^2 0,99***) triângulo vazio e linha pontilhada. ns não significativo; * significativo a 5% de probabilidade; *** significativo até 0,1% de probabilidade de erro pelo teste F.

A interação LA x SA também ocorreu para recuperação de potássio pelo milho ($p < 0,01$) (RKM). Da mesma maneira que para o AKMPF, a interação ocorreu porque o RKM em LA1 foi maior para o SA1 (65%) comparado ao SA2 (54%), enquanto que o RKM foi o mesmo independente do SA para LA2 (29%) e LA3 (6%) (Figura 21).

Figura 21. Recuperação de potássio do fertilizante pelo milho (RKM) em Pedro Afonso 2015 (LA1), Pedro Afonso 2016 (LA2) e Palmas 2016 (LA3) para o potássio fornecido em soja e milho (SA1) e apenas na soja (SA2). Letras maiúsculas comparam as

médias entre locais/anos. Letras minúsculas comparam as médias para SA. As barras verticais indicam o erro padrão de quatro observações.

Também ocorreu interação entre LA e dose para RKM ($p < 0,05$). A interação (LA x dose) ocorreu porque o RKM foi superior na menor dose em quase todos os LA, com exceção de LA3 (Figura 22). O RKM na dose K60 em LA3 foi 32% inferior em comparação às maiores doses.

Figura 22. Recuperação de potássio do fertilizante pelo milho (RKM) em Pedro Afonso 2015 (LA1), Pedro Afonso 2016 (LA2) e Palmas 2016 (LA3) para as doses de K₂O (60, 120 e 180 kg ha⁻¹). Letras maiúsculas comparam as médias dos locais/anos. Letras minúsculas comparam as médias para doses. As barras verticais indicam o erro padrão de quatro observações.

3.3.3. Soja – Milho

Os sistemas de adubação e as doses de potássio não interferiram na produção de biomassa (PB), produção de grãos (PG) e no acúmulo de potássio nos grãos (AKG) da sucessão soja – milho (soja + milho) (Tabela 6). A PB, PG e o AKG diferiram apenas para LA ($p < 0,001$). A PB foi maior em LA1 (25.588 kg ha⁻¹) seguido de LA2 (21.354 kg ha⁻¹) e por último o LA3 (10.173 kg ha⁻¹). A PB variou entre 24.060 e 26.865 kg ha⁻¹ para LA1, 18.745 e 24.668 kg ha⁻¹ em LA2, e 8.027 e 12.166 kg ha⁻¹ para LA3. O PG foi maior em LA1 (10.636 kg ha⁻¹) do que em LA2 (8.968 kg ha⁻¹), e LA3 não produziu grãos. Da mesma forma que para PG, o AKG foi maior em LA1 (79 kg ha⁻¹) do que LA2 (70 kg ha⁻¹). O acúmulo de potássio na biomassa (AKB) de soja e milho mostrou resposta a dose de potássio ($p < 0,001$) e seguiu o mesmo comportamento que o acúmulo de potássio pelo milho. O AKB foi 195, 222, 227 e 258 kg ha⁻¹, média entre experimento e sistema de adubação, para as doses K0, K60, K120 e K180, respectivamente.

Tabela 6. Produção de biomassa (PB), acúmulo de potássio na biomassa (AKB), produção de grãos (PG) e acúmulo de potássio nos grãos (AKG) da sucessão soja – milho (soja + milho) vs. doses de K₂O (D) fornecidas em sistemas de adubação (SA) para soja e milho (SA1) ou apenas na soja (SA2) em Pedro Afonso 2015 (LA1), Pedro Afonso 2016 (LA2) e Palmas 2016 (LA3).

SA	D	LA1				LA2				LA3			
		PB	AKB	PG	AKG	PB	AKB	PG	AKG	PB	AKB	PG ^a	AKG ^a
	kg ha ⁻¹												
SA1	0	26.865	248	11.464	77	20.090	254	8.767	68	11.052	23	-	-
	60	24.060	264	9.822	79	21.311	306	8.995	73	8.027	23	-	-
	120	24.588	303	10.402	78	20.517	281	8.986	79	12.166	40	-	-
	180	25.844	380	10.692	82	20.139	291	8.322	67	9.167	26	-	-
Média		25.339	299	10.595	79	20.514	283	8.767	72	10.103	68	-	-
SA2	0	25.187	276	10.212	80	22.010	265	9.592	73	9.494	41	-	-
	60	26.352	311	11.213	80	23.354	337	9.402	70	9.452	30	-	-
	120	26.175	316	11.218	79	18.745	270	7.781	63	11.440	69	-	-
	180	25.634	340	10.068	76	24.668	353	9.898	66	10.591	27	-	-
Média		25.837	311	10.678	79	22.194	306	9.168	68	10.244	85	-	-
Média SA		25.588A	305A	10.636A	79A	21.354B	295AB	8.968B	70B	10.173C	77C	-	-
Pr > F													
		PB			AKB			PG			AKG		
LA		< 0,0001***			< 0,0001***			< 0,0001***			< 0,0001***		
SA		0,1808 ^{ns}			0,0614 ^{ns}			0,4693 ^{ns}			0,2695 ^{ns}		
D		0,9036 ^{ns}			0,0010**			0,8419 ^{ns}			0,7242 ^{ns}		
LA x SA		0,5191 ^{ns}			0,7913 ^{ns}			0,6336 ^{ns}			0,3776 ^{ns}		
LA x D		0,1437 ^{ns}			0,3402 ^{ns}			0,5874 ^{ns}			0,7194 ^{ns}		
SA x D		0,2693 ^{ns}			0,8076 ^{ns}			0,5748 ^{ns}			0,1950 ^{ns}		
LA x SA x D		0,5038 ^{ns}			0,4795 ^{ns}			0,0626 ^{ns}			0,1397 ^{ns}		
CV%		14,71			12,57			13,52			9,77		

ns não significativo; ** significativo até 1% de probabilidade; *** significativo até 0,1% de probabilidade de erro pelo teste F. a dados não disponíveis. Letras maiúsculas comparam as médias entre local/ano.

Modelos lineares e diretamente proporcionais foram significativos e ajustados para o AKB de LA1SA1 e LA3SA2, mesmo sem diferença significativa para os sistemas de adubação (Figura 23). As taxas de acúmulo foram 0,73 e 0,35 kg ha⁻¹ de K por unidade de K₂O para LA1SA1 e LA3SA2. O AKB aumentou 36% para LA1SA1 e 54% para LA3SA2 comparado ao K0 foi 365 kg ha⁻¹ em LA1SA1 e 117 kg ha⁻¹ em LA3SA2 na dose K180. A maior dose aplicada aumentou o AKB. As doses não alteraram o AKB para LA1SA2, LA2SA1, LA2SA2 e LA3SA1, e os valores médios foram 311, 283, 306 e 68 kg ha⁻¹, respectivamente.

Figura 23. Acúmulo de potássio na biomassa (AKB) de soja e milho vs. doses de K₂O fornecidas para soja e milho (SA1) ou apenas na soja (SA2) em Pedro Afonso 2015 (LA1), Pedro Afonso 2016 (LA2) e Palmas 2016 (LA3). As barras verticais indicam o erro padrão de quatro observações. Os modelos são: LA1SA1 $f(y) = 0,73x + 233,29$ (R^2 0,91**) círculo preenchido e linha contínua; LA3SA2 $f(y) = 0,35x + 54,22$ (R^2 0,90***) triângulo vazio e linha pontilhada. ** significativo a 1% de probabilidade; *** significativo a 0,1% de probabilidade de erro pelo teste F.

O acúmulo de potássio em soja e milho proveniente do fertilizante (AKSMPF) recebeu interação LA x SA ($p < 0,01$). Esta interação ocorreu porque as médias de AKSMPF entre doses não diferiram para LA1SA1 e LA1SA2 (100 kg ha⁻¹), entretanto LA2SA2 (66 kg ha⁻¹) foi superior à LA2SA1 (48 kg ha⁻¹) e LA3SA2 (32 kg ha⁻¹) foi superior à LA3SA1 (15 kg ha⁻¹) (Figura 24). A mesma interação (LA x SA) ocorreu para a recuperação de potássio por soja e milho (RKSM) ($p < 0,05$). Esta interação ocorreu pelos mesmos motivos que a anterior, a RKSM em LA1SA1 foi igual ao LA1SA2 e para os demais LA o SA2 foi superior ao SA1 (Figura 25). A RKSM foi a mesma entre LA1SA1 e LA1SA2 (86%), e LA2SA2 (59%) > LA2SA1 (39%), e LA3SA2 (27%) > LA3SA1 (13%).

A interação LA x dose foi observada apenas para AKSMPF ($p < 0,001$). A dose K60 no LA1 e LA2 resultou em AKSMPF equivalente aos das doses K120 do LA2 ($p > 0,05$) e K180 do LA3 ($p > 0,05$), respectivamente. Para o LA3, as doses K120 e K180 foram iguais no acúmulo de potássio do fertilizante (30 kg ha⁻¹) ($p > 0,05$). No entanto, o AKSMPF mostrou comportamento linear e diretamente proporcional, com taxas de 0,78, 0,87, 0,36, 0,38, 0,13 e 0,25 kg de K por kg de K₂O para LA1SA1, LA1SA2, LA2SA1, LA2SA2, LA3SA1 e LA3SA2, respectivamente (Figura 24). De acordo com os limites de confiança dos modelos de AKSMPF apenas LA1SA1 foi diferente de LA2SA1. Ainda sobre os limites de confiança dos modelos, a dose K60 foi igual a 33 kg ha⁻¹ de K por unidade de K₂O nos três LA.

Figura 24. Acúmulo de potássio na sucessão soja – milho proveniente do fertilizante (AKSMPF) vs. doses de K_2O fornecidas para soja e milho (SA1) e apenas na soja (SA2) em Pedro Afonso 2015 (LA1), Pedro Afonso 2016 (LA2) e Palmas 2016 (LA3). As barras verticais indicam o erro padrão de quatro observações. Os modelos são: LA1SA1 $f(y) = 0,78x + 8,47$ (R^2 0,98***) círculo preenchido e linha contínua; LA1SA2 $f(y) = 0,87x - 5,16$ (R^2 0,99***) círculo vazio e linha pontilhada; LA2SA1 $f(y) = 0,36x + 5,65$ (R^2 0,94*) quadrado preenchido e linha contínua; LA2SA2 $f(y) = 0,38x + 20,05$ (R^2 0,99**) quadrado vazio e linha pontilhada; LA3SA1 $f(y) = 0,13x - 0,51$ (R^2 0,74*) triângulo preenchido e linha contínua; LA3SA2 $f(y) = 0,25x + 2,57$ (R^2 0,99***) triângulo vazio e linha pontilhada. * significativo a 5% de probabilidade; ** significativo até 1% de probabilidade; *** significativo até 0,1% de probabilidade de erro pelo teste F.

Figura 25. Recuperação de potássio do fertilizante em soja e milho (RKSM) em Pedro Afonso 2015 (LA1), Pedro Afonso 2016 (LA2) e Palmas 2016 (LA3) para o potássio fornecido em soja e milho (SA1) e apenas na soja (SA2). Letras maiúsculas comparam as médias entre LA. Letras minúsculas comparam as médias para SA. As barras verticais indicam o erro padrão de quatro observações.

3.4. Discussão

3.4.1. Soja

A antecipação de potássio do milho na soja não alterou a produção de biomassa e grãos, nem o acúmulo de potássio na biomassa e grãos da soja nos três experimentos. Estes resultados foram distintos dos determinados por Kolar e Grewal (1994) em soja irrigada. No entanto, o fornecimento de K raramente altera o desempenho das culturas quando o solo apresenta teor de nutriente disponível capaz de atender a demanda de plantas (Bruns e Ebelhar, 2006; Clover e Mallarino, 2013; Fulford e Culman, 2018; Heckman e Kamprath, 1992; Oltmans e Mallarino, 2015; Sparks et al., 1980; Wortmann et al., 2009; Yao et al., 2003), e em alguns casos, mesmo em solo com baixo teor de K trocável (Askegaard e Eriksen, 2002; Oltmans e Mallarino, 2015).

O acúmulo de potássio do fertilizante pela cultura da soja aumentou em razão da dose de potássio e a taxa média foi de 0,22 kg de K por unidade de K_2O (Figura 17), embora a recuperação de potássio do fertilizante pela soja tenha sido de 30%, obtida pela média entre doses (Figura 18). No entanto, Kolar e Grewal (1994) determinaram 45% de recuperação do potássio do fertilizante na soja pelo método de recuperação aparente (adubado vs. não adubado) e para doses menores que 90 kg ha^{-1} de K_2O . Os resultados da presente pesquisa, mostraram que a aplicação de potássio favoreceu o acúmulo de K-fertilizante pela planta sobre o K-solo, uma vez que o acúmulo de potássio na biomassa foi igual, e isto também foi observado por Yao et al. (2003). Salvo ainda que, segundo Pivetta et al. (2011) a atividade radicular da soja, mensurada com Rb no estágio fenológico R4, foi restrita à camada de 0,1m do solo e concentrada abaixo da fileira de plantas.

3.4.2. Milho

O sistema de adubação não alterou a produção de biomassa e grãos, nem o acúmulo de K em biomassa e grãos na cultura do milho (Tabela 5). Na mesma direção do sistema de adubação, as doses de K favoreceram o acúmulo de K na biomassa do milho. A resposta no acúmulo de potássio pelo milho segunda safra se deve pelos quase 50% de exportação de todo o potássio acumulado pela soja cultivada em primeira safra, além de maior extração de potássio pelo milho (8%) em comparação à soja. Similar aos resultados obtidos na presente pesquisa, Fulford e Culman (2018) observaram resposta menor que 10% na produção de grãos de milho e soja para a aplicação de fósforo e potássio em doses até duas vezes maior que a exportação pelos grãos. Oltmans e Mallarino (2015) observaram que a aplicação de potássio aumentou a produtividade de grãos de milho em apenas 11 de 33 locais. Clover e Mallarino (2013) relataram que o acúmulo de potássio pelos grãos de milho mostrou baixa frequência de resposta a aplicação de potássio em relação aos da soja. Bruns e Ebelhar (2006) não obtiveram resposta para produtividade e acúmulo de potássio nos grãos de milho irrigado com a aplicação de até 160 kg ha^{-1} de K_2O . Bordoli e Mallarino (1998) e Heckman e Kamprath (1992) obtiveram algumas respostas em produtividade do milho para a aplicação de potássio no sulco após períodos com restrição hídrica. No entanto, Niu et al. (2011) obtiveram resposta de até 21% na produção de grãos pela aplicação de potássio no milho.

A recuperação de potássio pelo milho foi em média 31%. Este valor foi superior aos 23% de Niu et al. (2011) e intermediário aos 29-37% de Qiu et al. (2014), ambos determinados por recuperação aparente. O resultado de recuperação de potássio pelo milho (31%) foi similar a média obtida pela recuperação da soja (30%) entre doses e

experimentos. No entanto, a recuperação de potássio pelo milho foi 17% maior para o parcelamento sobre a antecipação de potássio na safra 2014/2015, enquanto que o sistema de adubação não diferiu para a safra 2015/2016 dos outros experimentos. A recuperação de potássio pela soja contribuiu na manutenção da recuperação de K do milho principalmente na adubação antecipada da segunda safra, mesmo com exportação de 48% de potássio do fertilizante pelos grãos, média entre experimentos (dados não apresentados). Rosolem e Pivetta (2017) observaram atividade significativa das raízes de milho até profundidade de 0,6 m de solo, também por meio de rubídio. Portanto, a transferência de potássio do fertilizante feita pela cultura da soja, assim como o residual de fertilizante no solo oriundo da aplicação feita na soja, podem ainda ter sido sincronizadas com o período de maior absorção pela cultura do milho. Por outro lado, o efeito do parcelamento de potássio em favor da recuperação de K pelo milho na primeira safra se deve à um grupo de causas. Nesta pesquisa a aplicação de potássio na cultura do milho resultou em potássio prontamente disponível no solo que pode ter sido mais absorvido pelas plantas sobre o potássio nativo do solo, conforme observado por Yao et al. (2003). O efeito da dose de potássio disponível no solo ao milho foi complementado ao efeito do índice pluviométrico com distribuição regular e superior (17%) da primeira safra sobre a segunda em Pedro Afonso (Figura 2, capítulo anterior). Ainda entre esses locais, a população de plantas do milho foi 17% superior na primeira safra, o que de acordo com Ciampitti et al. (2013) favorece o acúmulo de potássio por área. Portanto, os efeitos de população e precipitação favoreceram os acúmulos de potássio em biomassa e grãos, além da produção de biomassa e grãos, na primeira safra em Pedro Afonso (Tabela 5).

3.4.3. Soja – Milho

A recuperação de K-fertilizante na sucessão soja – milho foi 52% média entre sistemas de adubação, doses de potássio e local/ano. No entanto, esta recuperação foi igual entre os sistemas de adubação na primeira safra (86%) e a antecipação de potássio foi superior para Pedro Afonso (29%) e Palmas (56%) na safra 2015/2016. A confirmação da hipótese de igualdade para a recuperação de K pela sucessão entre os sistemas de adubação se deu apenas na primeira safra, enquanto na outra safra houve vantagem para a antecipação de potássio. No entanto, o aumento na diferença entre as recuperações de K pela sucessão (Figura 25) e pelo milho (Figura 21) para a antecipação ocorreu em todos os experimentos e foi originário da recuperação de K da soja (Figura 18). O objetivo deste estudo não foi conhecer a transferência de potássio do fertilizante da cultura da soja para o milho. No entanto, nem todo o potássio do fertilizante absorvido pela soja foi aproveitado pela cultura do milho, parte permaneceu no solo e parte foi removido pelos grãos na colheita da soja. O potássio removido pela exportação dos grãos de soja desta pesquisa foi ~50% do total absorvido pela planta e foi observado também por Oltmans e Mallarino (2015). No entanto, a média entre experimentos para o AKB pela soja e pelo milho mostrou que o milho foi 8% superior à soja (Tabelas 3 e 4), mesmo com recuperação de K pela soja obtida no período de máximo acúmulo da planta. Em geral, a sucessão soja – milho desta pesquisa recuperou 12-89% de potássio do fertilizante e outros autores também com a técnica do traçador recuperaram 61-77% (em três cultivos) na couve-chinesa (Yao et al., 2003), 19-54% no milho (Murphy et al., 1955) e 20-40% no algodão (Hafez e Stout, 1973).

A maturidade fisiológica e a colheita do milho nesta pesquisa ocorreram durante estiagem e permitiram manutenção dos resíduos de biomassa e potássio (inclusive do fertilizante) sobre a superfície do solo. A liberação relativa de potássio do resíduo pela cultura do milho foi 36% inferior à soja (Oltmans e Mallarino, 2015). Desse modo, o potássio do fertilizante remanescente no solo pode permanecer junto ao potássio nativo do solo para aproveitamento pelo cultivo seguinte. Segundo Askegaard e Eriksen (2000) a quantidade de potássio medida à um

metro de profundidade foi de apenas 1,5 kg ha⁻¹ de K ao ano. No entanto, em áreas tropicais de rotação milho – soja, o balanço de K no sistema solo – planta pode ser negativo para a camada de 0,6m do solo, em razão da lixiviação de potássio (Calonego e Rosolem, 2013).

Em geral, a antecipação de potássio do milho na soja não mostrou efeito negativo no desempenho das culturas, além de garantir igual ou maior aproveitamento de K-fertilizante pela sucessão (soja + milho). No entanto, pesquisas complementares na reciclagem de potássio do fertilizante pela soja que será aproveitado pelo milho e a avaliação do efeito residual da antecipação de potássio nas culturas da safra seguinte são perspectivas para aprimorar o conhecimento desta técnica para a sucessão soja – milho segunda safra.

3.5. Conclusões

O aproveitamento de K-fertilizante pela sucessão soja-milho foi similar e até superior (22%) para a antecipação de potássio, sem interferir no desempenho das culturas. Portanto, a antecipação de potássio como sistema de adubação é viável.

Referências

- Alvares, C.A., Stape, J.L., Sentelhas, P.C., De Moraes Gonçalves, J.L., Sparovek, G., 2013. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorol. Zeitschrift* 22, 711–728. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- Askegaard, M., Eriksen, J., 2002. Exchangeable potassium in soil as indicator of potassium status in an organic crop rotation on loamy sand. *Soil Use Manag.* 18, 84–90. <https://doi.org/10.1079/SUM2001105>
- Askegaard, M., Eriksen, J., 2000. Potassium retention and leaching in an organic crop rotation on loamy sand as affected by contrasting potassium budgets. *Soil Use Manag.* 16, 200–205.
- Baligar, V.C., Bennett, O.L., 1986a. Outlook on fertilizer use efficiency in the tropics. *Fertil. Res.* 10, 83–96. <https://doi.org/10.1007/BF01073907>
- Baligar, V.C., Bennett, O.L., 1986b. NPK-fertilizer efficiency—a situation analysis for the tropics. *Fertil. Res.* 10, 147–164. <https://doi.org/10.1007/BF01074369>
- Baligar, V.C., Fageria, N.K., He, Z.L., 2001. Nutrient use efficiency in plants. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 32, 921–950. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-10635-9>
- Blake, L., Mercik, S., Koerschens, M., Moskal, S., Poulton, P.R., Goulding, K.W.T., Weigel, A., Powlson, D.S., 1999. Phosphorus content in soil, uptake by plants and balance in three European long-term field experiments. *Plant Soil* 216, 1–14.
- Bordoli, J.M., Mallarino, A.P., 1998. Deep and shallow banding of phosphorus and potassium as alternatives to broadcast fertilization for no-till corn. *Agron. J.* 90, 27–33. <https://doi.org/10.2134/agronj1998.00021962009000010006x>
- Bruns, H.A., Ebelhar, M.W., 2006. Nutrient uptake of maize affected by nitrogen and potassium fertility in a humid subtropical environment. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 37, 275–293. <https://doi.org/10.1080/00103620500408829>
- Buxbaum, C.A., Nowak, C.A., White, E.H., 2001. Long-term soil nutrient dynamics and lateral nutrient movement in

- fertilized and unfertilized red pine plantations. *Biogeochemistry* 55, 269–292. <https://doi.org/10.1023/A:1013239501422>
- Calonego, J.C., Rosolem, C.A., 2013. Phosphorus and potassium balance in a corn-soybean rotation under no-till and chiseling. *Nutr. Cycl. Agroecosystems* 96, 123–131. <https://doi.org/10.1007/s10705-013-9581-x>
- Ciampitti, I.A., Camberato, J.J., Murrell, S.T., Vyn, T.J., 2013. Maize nutrient accumulation and partitioning in response to plant density and nitrogen rate: I. macronutrients. *Agron. J.* 105, 727–734. <https://doi.org/10.2134/agronj2012.0467>
- Clover, M.W., Mallarino, A.P., 2013. Corn and soybean tissue potassium content responses to potassium fertilization and relationships with grain yield. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 77, 630–642. <https://doi.org/10.2136/sssaj2012.0223>
- Deist, J., Talibudeen, O., 1967. Rubidium 86 as a tracer for exchangeable potassium in soils. *Soil Sci.* 104, 119–122.
- Dobermann, A., 2007. Nutrient use efficiency – measurement and management, in: *Fertilizer Best Management Practices*. International Fertilizer Industry Association, Paris.
- Duivenbooden, N. van, Wit, C.T. de, Keulen, H. van, 1996. Nitrogen, phosphorus and potassium relations in five major cereals reviewed in respect to fertilizer recommendations using simulation modelling. *Fertil. Res.* 44, 37–49. <https://doi.org/10.1007/BF00750691>
- Fehr, W.R., Caviness, C.E., Burmood, D.T., Pennington, J.S., 1971. Stage of development descriptions for soybeans, *Glycine max* (L.) Merrill. *Crop Sci.* 11, 929–931. <https://doi.org/10.2135/cropsci1971.0011183X001100060051x>
- Fulford, A.M., Culman, S.W., 2018. Over-fertilization does not build soil test phosphorus and potassium in Ohio. *Agron. J.* 110, 56–65. <https://doi.org/10.2134/agronj2016.12.0701>
- Gaspar, A.P., Laboski, C.A.M., Naeve, S.L., Conley, S.P., 2017. Phosphorus and potassium uptake, partitioning, and removal across a wide range of soybean seed yield levels. *Crop Sci.* 57, 2193–2204. <https://doi.org/10.2135/cropsci2016.05.0378>
- Hafez, A.A.R., Stout, P.R., 1973. Use of indigenous soil-rubidium absorbed by cotton plants in determining labile soil-potassium pool sizes. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 37, 572–579. <https://doi.org/10.2136/sssaj1973.03615995003700040030x>
- Heckman, J.R., Kamprath, E.J., 1992. Potassium accumulation and corn yield related to potassium fertilizer rate and placement. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56, 141–148. <https://doi.org/10.2136/sssaj1992.03615995005600010022x>
- Kolar, J.S., Grewal, H.S., 1994. Effect of split application of potassium on growth, yield and potassium accumulation by soybean. *Fertil. Res.* 39, 217–222. <https://doi.org/10.1007/BF00750249>
- Kuhlmann, H., 1990. Importance of the subsoil for the K nutrition of crops. *Plant Soil* 127, 129–136. <https://doi.org/10.1007/BF00010845>
- Murphy, W.S., Hunter, A.H., Pratt, P.F., 1955. Absorption of rubidium by plants from solution and soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 19, 433–435. <https://doi.org/10.2136/sssaj1955.03615995001900040010x>
- Niu, J., Zhang, W., Chen, X., Li, C., Zhang, F., Jiang, L., Liu, Z., Xiao, K., Assaraf, M., Imas, P., 2011. Potassium fertilization on maize under different production practices in the North China plain. *Agron. J.* 103, 822–829. <https://doi.org/10.2134/agronj2010.0471>
- Oltmans, R.R., Mallarino, A.P., 2015. Potassium uptake by corn and soybean, recycling to soil, and impact on soil test potassium. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 79, 314–327. <https://doi.org/10.2136/sssaj2014.07.0272>
- Pivetta, L.A., Castoldi, G., Santos, G.P. dos, Rosolem, C.A., 2011. Crescimento e atividade de raízes de soja em função do sistema de produção. *Pesq. Agropec. Bras.* 46, 1547–1554. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2011001100017>

- Qiu, S., Xie, J., Zhao, S., Xu, X., Hou, Y., Wang, X., Zhou, W., He, P., Johnston, A.M., Christie, P., Jin, J., 2014. Long-term effects of potassium fertilization on yield, efficiency, and soil fertility status in a rain-fed maize system in northeast China. *F. Crop. Res.* 163, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2014.04.016>
- Rodrigues, M., Pavinato, P.S., Withers, P.J.A., Teles, A.P.B., Herrera, W.F.B., 2016. Legacy phosphorus and no tillage agriculture in tropical oxisols of the Brazilian savanna. *Sci. Total Environ.* 542, 1050–1061. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.08.118>
- Rosolem, C.A., Pivetta, L.A., 2017. Mechanical and biological approaches to alleviate soil compaction in tropical soils: assessed by root growth and activity (Rb uptake) of soybean and maize grown in rotation with cover crops. *Soil Use Manag.* 33, 141–152. <https://doi.org/10.1111/sum.12313>
- Silva, E.V. da, Bouillet, J.-P., Gonçalves, J.L. de M., Abreu Junior, C.H., Trivelin, P.C.O., Hinsinger, P., Jourdan, C., Nouvellon, Y., Stape, J.L., Laclau, J.-P., 2011. Functional specialization of Eucalyptus fine roots: contrasting potential uptake rates for nitrogen, potassium and calcium tracers at varying soil depths. *Funct. Ecol.* 25, 996–1006. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2011.01867.x>
- Sparks, D.L., Martens, D.C., Zelazny, L.W., 1980. Plant uptake and leaching of applied and indigenous potassium in Dothan soils. *Agron. J.* 72, 551–555. <https://doi.org/10.2134/agronj1980.00021962007200030034x>
- Walker, J.M., Barber, S.A., 1962. Absorption of potassium and rubidium from the soil by corn roots. *Plant Soil* 17, 243–259. <https://doi.org/10.1007/BF01376227>
- Wortmann, C.S., Dobermann, A.R., Ferguson, R.B., Hergert, G.W., Shapiro, C.A., Tarkalson, D.D., Walters, D.T., 2009. High-yielding corn response to applied phosphorus, potassium, and sulfur in Nebraska. *Agron. J.* 101, 546–555. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0103x>
- Yao, Y., Yoneyama, T., Hayashi, H., 2003. Potassium uptake by Chinese cabbage (*Brassica pekinensis* Rup.) from fused potassium silicate, a slow-releasing fertilizer. *Plant Soil* 249, 279–286. <https://doi.org/10.1023/A:1022841017303>