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

Contribuição relativa do K de zonas do solo para o conteúdo na soja e plantas em
sucessão

Danyllo Santos Dias

Dissertação apresentada para a obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração: Fitotecnia

Piracicaba
2018

Danyllo Santos Dias
Engenheiro Agrônomo

**Contribuição relativa do K de zonas do solo para o conteúdo na soja e plantas em
sucessão**

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

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

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração: Fitotecnia

Piracicaba
2018

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

Dias, Danyllo Santos

Contribuição relativa do K de zonas do solo para o conteúdo na soja e plantas em sucessão / Danyllo Santos Dias. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2018.

30 p.

Dissertação (Mestrado) - - USP / Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Rb como marcador de K 2. Ciclagem e reciclagem 3. Consórcio de plantas 4. Sistemas de produção I. Título

Agradecimentos

Aos meus familiares que mesmo distantes, sempre me apoiaram em minhas decisões.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsa de estudos durante o mestrado.

Ao Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, Departamento de Produção de Vegetal da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, pela oportunidade de realizar o mestrado.

Ao orientador Prof. Dr. José Laércio Favarin pela dedicação e conhecimentos transmitidos.

À Fundação Agrisus pelo financiamento concedido a esta pesquisa, o que viabilizou a condução da mesma (PA 1755/16).

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) e à Fundação de Estudos Agrários Luiz de Queiroz (FEALQ) pelo apoio financeiro.

Ao Prof. Dr. Darly Geraldo de Sena Junior por todo apoio prestado durante a condução deste trabalho.

À Universidade Federal de Goiás, Regional Jataí, pelo fornecimento da área experimental para a realização desta pesquisa. E a todos os colegas desta instituição que de forma direta ou indireta contribuíram para que o trabalho fosse conduzido com sucesso.

A todos os colegas do Grupo de Pesquisa em Produção Agrícola (GPPA), um agradecimento especial.

SUMÁRIO

RESUMO	5
ABSTRACT	6
1. INTRODUÇÃO	7
2. MATERIAL E MÉTODOS	9
2.1. ANÁLISES DE Rb e K	13
2.2. CONTRIBUIÇÃO RELATIVA DO K DE AS CAMADAS DE SOLO PARA O K ACUMULADO NAS PLANTAS.....	13
2.3. TRANSFERÊNCIA RELATIVA DO K DO RESÍDUO DA SOJA PARA AS PLANTAS EM SUCESSÃO.....	15
2.4. ANÁLISES ESTATÍSTICAS	16
3. RESULTADOS	17
3.1. PRODUTIVIDADE DE GRÃOS E DE BIOMASSA SECA, E K ACUMULADO NAS PLANTAS.....	17
3.2. CONTRIBUIÇÃO RELATIVA DO K DE DIFERENTES CAMADAS DO SOLO PARA O CONTEÚDO NA SOJA.....	17
3.3. CONTRIBUIÇÃO RELATIVA DO K DE DIFERENTES CAMADAS DO SOLO PARA AS PLANTAS EM SUCESSÃO ...	18
3.4. TRANSFERÊNCIA RELATIVA DE K OU RECICLAGEM DO RESÍDUO DA SOJA PARA AS PLANTAS EM SUCESSÃO	20
3.5. CONTRIBUIÇÃO RELATIVA DO K PROVENIENTE DO SOLO, CICLADO PELA SOJA ÀS PLANTAS EM SUCESSÃO	20
3.6. CONTRIBUIÇÃO RELATIVA DO K PROVENIENTE DO SOLO E DO RESÍDUO DA SOJA PARA O SISTEMA DE PRODUÇÃO.....	21
4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	23
4.1. PRODUÇÃO DE MATÉRIA SECA E ACUMULO DE K PELA SOJA E CULTURAS EM SUCESSÃO.....	23
4.2. CONTRIBUIÇÃO RELATIVA DE K DE AS DIFERENTES ZONAS DO SOLO PARA A SOJA E PLANTAS EM SUCESSÃO	24
5. CONCLUSÕES	27
REFERÊNCIAS	29

RESUMO

Contribuição relativa do K de zonas do solo para o conteúdo na soja e plantas em sucessão

Esta pesquisa foi realizada com o objetivo de identificar a zona do solo de onde o K foi absorvido e acumulado na soja (safra) e nas plantas em sucessão (segunda safra: milho, braquiária e milho consorciado com a braquiária). Para tanto, utilizou o elemento rubídio (Rb) como marcador do nutriente potássio (K), o qual foi posicionado na superfície do solo, a 30 cm e 60 cm de profundidade. A contribuição relativa de as camadas do solo para a ciclagem de K será assumida como proveniente dos primeiros 30 cm de solo (Rb na superfície), de 30 cm a 60 cm (Rb a 30 cm) e de 60 cm a 90 cm de profundidade (Rb a 60 cm). Ainda, a ciclagem de K foi obtida indiretamente, a partir da recuperação de Rb, com base na hipótese de que a mesma equivale à recuperação de K do solo. O experimento foi realizado na Universidade Federal de Goiás, Regional de Jataí, no ano agrícola 2015/2016. O delineamento experimental foi em blocos casualizados, com parcelas subdivididas e quatro repetições. As parcelas constituem os sistemas de produção (soja, soja/milho, soja/braquiária e soja/milho-braquiária), e as subparcelas correspondem às profundidades onde foi posicionado o Rb (superfície do solo, 30 e 60 cm de profundidade). Na soja, a maior parte do K (60%) acumulado foi absorvida da camada superficial do solo, e nas plantas em sucessão a contribuição foi das camadas subsuperficiais, abaixo de 30 cm de profundidade (braquiária - 74%, milho-braquiária - 71% e milho - 81%). A recuperação do K reciclado da parte aérea da soja foi maior para a forrageira (84%), seguida pelo consórcio milho-braquiária (13%) e milho (2,5%).

Palavras-chave: Rb como marcador de K; Ciclagem e reciclagem; Consórcio de plantas; Sistemas de produção

ABSTRACT

Relative contribution of soil K to total contents in soybean plants and succession plants

This research was carried out to identify the soil depth from where K was absorbed and accumulated in the soybean (first season) and in the plants of succession (second season: corn, brachiaria and corn-brachiaria intercropped). In order to do so, it was used the rubidium element (Rb) as marker of potassium nutrient (K), which was positioned on the soil surface, 30 cm and 60 cm depths. The relative contribution of the soil layers to the K cycling will be assumed as the amount coming from the first 30 cm of soil (Rb at the surface), from 30 cm to 60 cm (Rb at 30 cm) and from 60 cm to 90 cm depth (Rb at 60 cm). Also, the cycling of K was obtained indirectly, from the recovery of Rb based on the hypothesis that it has equal recovery of K from the soil. The experiment was carried out at the Federal University of Goiás, Jataí Regional, in the season of 2015/2016. The experimental design was split-plot with randomized blocks and four replicates. The plots constitute the production systems (soybean, soybean/corn, soybean/brachiaria and soybean/corn-brachiaria intercropped), and the subplots correspond to the depths where the Rb was placed (soil surface, 30 and 60 cm deep). In soybean, most of the K uptake (60%) was taken from the soil surface layer, and in the plants in succession the contribution was from the subsurface layers, below 30 cm depth (brachiaria - 74%, Brachiaria-corn - 71% and corn - 81%). The recovery of recycled K of the soybean above ground was higher in the forage (84%), followed by the corn-brachiaria intercropped (13%) and corn (2.5%).

Keywords: Rb as K tracer, Cycling and recycling, Plant intercropping, Production System

1. INTRODUÇÃO

O cultivo da soja (*Glycine max* L. Merr) na safra, seguida pela semeadura do milho (*Zea mays* L.) na segunda safra é uma das sucessões de cultivos mais utilizadas em parte da região sudeste e no centro-oeste do Brasil. No ano agrícola 2015/2016 foram cultivados 58,3 milhões de hectares, dos quais em 33,2 milhões de hectares foi semeada soja e, na segunda safra, 10,6 milhões de hectares com milho (CONAB, 2017).

Solos cultivados a tempo apresentam, em geral, teores médios de nutrientes, situação em que é pouco provável resposta a adubação. Nestes solos, faz-se a adubação de correção e manutenção dos nutrientes equivalente a quantidade exportada nos grãos. Na sucessão soja/milho são exportados, em média, 127 kg ha⁻¹ de K, dos quais 67 kg é consumido para produzir 4,0 Mg ha⁻¹ de soja e 60 kg ha⁻¹ de K para produzir mais 6,0 Mg ha⁻¹ de milho. O Brasil consome, anualmente, 5,72 milhões de toneladas de KCl em 43,8 milhões de hectares com a sucessão soja/milho. Portanto, pesquisas sobre a ciclagem de K são importantes para a economia nacional, haja vista que mais de 90% desse fertilizante é importado (DNPM, 2014).

Cabe à ciência agrônômica definir a sucessão de plantas, cultivo na safra e na segunda safra, eficiente na recuperação do K, principalmente a parte do nutriente presente nas camadas em profundidade no solo, de onde pode ser facilmente lixiviado. Quanto mais K houver na biomassa, e mais biomassa for produzida menor será a perda desse nutriente. A ciclagem contribui para manter o K no sistema de produção (GREGORY, 1992; DUDA et al., 2003; FOLONI et al. 2006; BOER et al., 2007; FERREIRA et al., 2011; CALONEGO et al., 2012; PACHECO et al., 2013; SILVA & LAZARINI, 2014). No entanto, esse processo seria bem mais significativo se fosse identificada a contribuição relativa do K de as camadas do solo em subsuperfície para a quantidade acumulada na planta. Assim, seria possível identificar sistemas de produção capazes de manter e/ou recuperar o K do solo e/ou do fertilizante.

Visto que a distribuição da chuva na segunda safra é determinante para a escolha da cultura a ser implantada em sucessão a soja, a opção pela formação de biomassa no Cerrado deve considerar não apenas a produção de grãos, mas também a quantidade de resíduo vegetal, seja para a proteção do solo em sistema de semeadura direta ou para pastejo animal.

A implantação de culturas que possuam raízes em subsuperfície é uma condição necessária para aumentar a ciclagem do K. Afirmações acerca desse assunto são válidas, desde que seja identificada a camada do solo de onde o K foi efetivamente absorvido pela planta. No entanto, as pesquisas discutem a ciclagem sem distinguir a zona de origem deste nutriente, se proveniente da camada superficial do solo ou da subsuperfície do mesmo.

A fim de esclarecer essas e outras questões acerca do K no sistema solo-planta-resíduo foi usado o elemento Rubídio (Rb) como indicador de K (SILVA et al., 2011). O Rb possui raio hidratado semelhante ao do nutriente, se liga no mesmo local nos transportadores na raiz (ERDEI & TRIVEDI, 1991) e o mecanismo que promove seu contato com as raízes também é o mesmo (MENZEL & HEAD,

1955). Sabe-se, ainda, que a aplicação de até 30% da dose recomendada de K na forma de Rb não prejudicou o desenvolvimento do milho, conduzido em casa de vegetação (MIGLIAVACCA, 2015).

A ciclagem de K de as camadas profundas do solo varia com a espécie e depende, fundamentalmente, das plantas cultivadas na segunda safra, uma vez que a soja é a principal cultura da safra, e é pouco efetiva nesse sentido (PIVETTA et al., 2011). Este processo depende, ainda, da duração do ciclo, da quantidade de biomassa produzida, da concentração do nutriente no tecido vegetal, e, também, da capacidade de as plantas explorarem o solo em profundidade. Nos sistemas de produção em que a braquiária e/ou milho estão presentes espera-se uma maior ciclagem de K, em razão de a forrageira e o milho atenderem os pré-requisitos acima, comparativamente aos sistemas sem a presença destas espécies.

A presente pesquisa foi realizada com o objetivo de identificar a zona do solo de onde o K foi absorvido e acumulado na soja (safra) e nas plantas em sucessão (milho, braquiária e milho consorciado com braquiária).

2. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi instalado na área experimental da Universidade Federal de Goiás, Regional Jataí, no Sudoeste Goiano, e conduzido no ano agrícola 2015/2016. O solo da área experimental é classificado como Latossolo Vermelho distroférrico, baixa fertilidade e alto teores de Fe_2O_3 (18 a 36%) (EMBRAPA, 2013), com teores de argila iguais a 441 g, 539 g e 540 g kg^{-1} de solo, nos primeiros 20 cm de solo, de 20 cm a 40 cm e de 40 cm a 60 cm de profundidade, nessa ordem. Os resultados da análise química estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Atributos químicos do solo nos primeiros 20 cm de solo, de 20 cm a 40 cm e de 40 cm a 60 cm de profundidade, antes da instalação do experimento

Profundidade (cm)	pH CaCl ₂	MO g dm ⁻³	P mg dm ⁻³	K	Ca	Mg	H+Al	Al	SB	CTC	V
				-----mmol _c dm ⁻³ -----							%
0-20	5,0	64	13	2,1	26	12	34	1	40	74	54
20-40	5,1	50	6	1,8	17	9	34	0	28	62	45
40-60	5,1	37	4	1,2	9	5	34	0	15	49	31

pH: CaCl₂ 0,01 mol.L⁻¹; P, K, Ca, Mg: extração por resina trocadora de íons; H+Al: pH SMP; MO: matéria orgânica, determinada por dicromato/colorimetria. CTC determinou-se pela soma de K, Ca, Mg e H+Al; a saturação por bases (V%) é obtida pela relação entre o somatório dos cátions básicos (SB: K, Ca e Mg) e a CTC (RAIJ et al., 2001)

O clima da região é classificado como Aw de acordo com a classificação Koppen, com temperatura média anual de 22 °C e precipitação pluvial de 1.750 mm. Os dados da precipitação pluvial, temperatura média e o balanço de água no solo no ano agrícola 2015/2016 estão apresentados nas Figuras 1 e 2.

Figura 1. Precipitação pluvial (mm) e temperatura média (°C) registradas no ano agrícola 2015/2016, assim como as épocas em que foi semeada a soja e as plantas cultivadas em sucessão – na segunda safra (milho, braquiária e milho consorciado com braquiária)

Figura 2. Balanço de água no solo durante a condução do experimento no ano agrícola 2015/2016, e épocas em que a soja e as culturas da segunda safra (milho, braquiária e milho-braquiária) foram semeadas, adubadas e colhidas

O delineamento experimental foi em blocos ao acaso, com parcelas subdivididas e quatro repetições. Os sistemas de produção foram definidos pela sucessão de plantas na safra (soja) e segunda safra (milho, braquiária e milho-braquiária). As subparcelas ou microparcels representaram as

profundidades onde foi aplicado o Rb (superfície, 30 e 60 cm), como marcador de K. As parcelas eram formadas por dez linhas de soja e milho com 4,5 m de largura e 15 m de comprimento, enquanto as microparcelsas por três linhas de soja com 1,0 m de comprimento, localizadas no centro da parcela.

O Rb foi aplicado na forma de cloreto de rubídio (RbCl) diluído em 80 mL de água, com o fornecimento de 0,9 gramas de Rb às plantas de soja presentes em 1 m de comprimento, inferior a quantidade máxima admitida sem prejuízo à nutrição potássica da planta (MIGLIAVACCA, 2015). A aplicação foi feita no estágio V1 (FEHR & CAVINESS 1977), adicionando 10 mL por orifício a 3 cm de profundidade, assumida como feita na superfície (80 mL). Para as aplicações feitas a 30 cm e 60 cm de profundidade, foi usado o mesmo volume, agora em oito orifícios abertos a 12,5 cm de distância, em 1 m de linha de soja, paralela ao sulco de semeadura (Figura 3). Os orifícios para aplicar a dose de Rb a 30 cm e 60 cm de profundidade no solo foram abertos de modo inclinado, a certa distância da soja, para que o elemento marcador ficasse sob o sulco da soja (Figura 4). O Rb foi aplicado somente na soja, na linha central das microparcelsas.

As culturas em monocultivo (soja, milho e braquiária) foram semeadas com espaçamento de 0,45 m entre as linhas, e no consórcio (milho-braquiária) o cereal também foi semeado a 0,45 m de distância entre linhas, enquanto a forrageira ficou no centro das linhas de milho - a 0,225 m das mesmas. A soja foi semeada em novembro de 2015 com sementes do cultivar DM 6563 IPRO, para uma densidade de 386.000 plantas ha⁻¹, e aplicação a lanço de 80 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 80 kg ha⁻¹ de K₂O (SOUSA & LOBATO, 2004).

Figura 3. Orifícios (x) para aplicar o Rb em profundidade, após a emergência da soja

Figura 4. Aplicação de Rb na soja feita na superfície (A), a 30 cm (B) e a 60 cm (C) de profundidade no solo

As coletas de plantas de soja foram realizadas no estágio R7, maturação fisiológica, (FEHR & CAVINESS 1977), a fim de evitar a perda de nutriente pela queda natural de folhas. A planta foi separada em parte aérea (folhas, pecíolos, hastes e cascas das vagens) e semente de soja, nas quais determinou-se a massa de matéria seca e a concentração de Rb e K. A produtividade foi determinada com a umidade da semente corrigida a 130 g de água por quilo de sementes (13%).

Depois da colheita da soja, o resíduo da parte aérea (caule, folhas e casca das vagens) presentes na microparcela original (MPO) foram recolhidas e picadas para simular a colheita mecânica. Em seguida, esse material (MPO) foi trocado com o mesmo material (caule, folhas e casca das vagens) da microparcela adjacente (MPA), e ambos foram colocados sobre o solo (Figura 5). Este procedimento foi adotado para avaliar a absorção do Rb aplicado no solo pelas plantas cultivadas na segunda safra nas parcelas da MPO (Rb solo, e resíduo de soja sem esse elemento, proveniente da MPA), bem como a transferência do Rb presente no resíduo da soja para as plantas cultivadas na segunda safra nas parcelas da MPA (sem Rb no solo, e resíduo da soja enriquecido com Rb, proveniente da MPO).

As plantas cultivadas na segunda safra como o milho, braquiária e milho-braquiária foram semeadas em fevereiro de 2016. Para o cereal usou o híbrido 2A401 PW, com densidade de 59.000 plantas.ha⁻¹. A forrageira, nas duas situações, foi semeada manualmente, para a qual empregou-se 3,4 kg ha⁻¹ de sementes viáveis em sulcos de 5 cm de profundidade. A adubação dessas plantas foi feita a lanço com 90 kg ha⁻¹ de N, 80 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 80 kg ha⁻¹ de K₂O. Ainda, no estágio V3 do milho (RITCHIE et al., 1992) aplicou mais 60 kg ha⁻¹ de N em cobertura, em todas as culturas.

Figura 5. Microparcelas originais (MPO1, MPO2 e MPO3, com Rb em diferentes zonas no solo), onde avaliou-se a absorção e ciclagem pelas plantas cultivadas na segunda safra. Nas microparcelas adjacentes (MPA4, MPA5 e MPA6), onde foi adicionado os resíduos das MPO, avaliou-se a absorção do Rb liberado do resíduo de soja e absorvido pelas plantas na segunda safra, transferido ou reciclado a essas plantas

As avaliações nas plantas cultivadas na segunda safra foram feitas na maturidade fisiológica do milho (estádio R6) (RITCHIE et al., 1992), que aconteceu 127 dias após a semeadura. A braquiária em consórcio com milho foi avaliada depois da colheita do cereal, e durante a entressafra, sempre que esta alcançava 40 cm de altura cortava-se manualmente até 20 cm de altura, simulando pastejo animal. A biomassa de cada corte era recolhida para determinar a massa de matéria seca produzida pela forrageira.

Esse procedimento se encerrou no início do novo ano agrícola (2016/2017), e as coletas compuseram uma amostra composta, na qual avaliou-se a produção total de biomassa seca e a concentração de K e Rb no tecido vegetal. No milho avaliou-se a massa de matéria seca dos grãos e da parte área (espiga, pendão, colmo, folhas e palha), após a colheita em julho de 2016.

2.1. Análises de Rb e K

Das amostras de tecido vegetal foram separadas subamostras, as quais foram secas em estufa com circulação de ar a 60 °C durante 72 horas. Em seguida, foram cominuídas em moinho tipo Wiley, e separou-se o material com partículas inferiores a 1,0 mm por meio de peneira. As concentrações de K e Rb foram determinadas por meio da análise de fluorescência de raios-X, com espectrômetro de raios-X de energia dispersiva (EDX-720 Shimadzu) (Tezotto et al., 2013).

Ressalte-se que a interferência da abundância natural de Rb no solo foi evitada por meio da análise de plantas das parcelas que não receberam este elemento, cuja concentração foi subtraída das plantas que receberam o Rb.

2.2. Contribuição relativa do K de as camadas de solo para o K acumulado nas plantas

A contribuição relativa de K (CRK) proveniente de as diferentes camadas do solo foi obtida com base na análise de Rb determinada na parte aérea da soja (safra) e nas culturas da segunda safra (milho, braquiária e milho-braquiária), conforme apresentado abaixo.

Da concentração de Rb determinada nas plantas da microparcela que receberam este elemento (RbPF) foi subtraída a concentração determinada nas plantas da microparcela sem a aplicação do mesmo (RbSF), a fim de descontar a quantidade absorvida de Rb nativo (enriquecimento natural do solo) ($RbP = RbPF - RbSF$). Ainda, as zonas identificadas como superfície, 30 cm e 60 cm de profundidade, correspondem à absorção dos primeiros 30 cm de solo, de 30 cm a 60 cm e de 60 cm a 90 cm de profundidade. Portanto, a quantidade de K foi obtida indiretamente a partir da recuperação de Rb, assumindo que esta equivale a recuperação de K.

A contribuição relativa de potássio (CRK) ou a ciclagem desse nutriente proveniente da camada superficial do solo, com base na análise de Rb na parte aérea da planta (RbP) submetida a aplicação na superfície do solo foi determinada conforme apresentado a seguir:

$$CRK\text{-}sp\ (\%) = [RbP\text{-}sp / (RbP\text{-}sp + RbP\text{-}30 + RbP\text{-}60)] \times 100$$

em que: CRK-sp (%) corresponde a contribuição relativa do elemento proveniente da aplicação feita na superfície do solo; RbP-sp (mg kg^{-1}) é a concentração de Rb determinado na planta, absorvido da aplicação feita na superfície do solo; RbP-30 (mg kg^{-1}) corresponde a concentração do mesmo, proveniente da aplicação feita a 30 cm de profundidade; RbP-60 (mg kg^{-1}) é a concentração do elemento absorvido da aplicação feita a 60 cm de profundidade.

A contribuição relativa (CRK) ou a ciclagem desse nutriente proveniente de 30 cm a 60 cm de profundidade do solo, com base na análise de Rb na parte aérea da planta submetida à aplicação feita a 30 cm de profundidade no solo foi determinada conforme apresentado a seguir:

$$\text{CRK-30 (\%)} = [\text{RbP-30} / (\text{RbP-sp} + \text{RbP-30} + \text{RbP-60})] \times 100$$

em que: CRK-30 (%) corresponde a contribuição relativa do elemento proveniente da aplicação feita a 30 cm de profundidade do solo; RbP-sp (mg kg^{-1}) é a concentração de Rb determinado na planta, absorvido da aplicação feita na superfície do solo; RbP-30 (mg kg^{-1}) corresponde a concentração do mesmo, proveniente da aplicação feita a 30 cm de profundidade; RbP-60 (mg kg^{-1}) é a concentração do elemento absorvido da aplicação feita a 60 cm de profundidade.

A contribuição relativa (CRK) ou a ciclagem desse nutriente proveniente de 60 cm a 90 cm de profundidade do solo, com base na análise de Rb na parte aérea da planta submetida à aplicação feita a 60 cm de profundidade no solo foi determinada conforme apresentado a seguir:

$$\text{CRK-60 (\%)} = [\text{RbP-60} / (\text{RbP-sp} + \text{RbP-30} + \text{RbP-60})] \times 100$$

em que: CRK-60 (%) corresponde a contribuição do elemento proveniente da aplicação feita a 60 cm de profundidade do solo; RbP-sp (mg kg^{-1}) é a concentração de Rb determinado na planta, absorvido da aplicação feita na superfície do solo; RbP-30 (mg kg^{-1}) corresponde a concentração do mesmo, proveniente da aplicação feita a 30 cm de profundidade; RbP-60 (mg kg^{-1}) é a concentração do elemento absorvido da aplicação feita a 60 cm de profundidade.

Com base no que foi descrito anteriormente, os valores obtidos para CRK-sp (%), CRK-30 (%) e CRK-60 (%) foram admitidos como sendo quantidades equivalentes de K absorvidas das diferentes situações em que se pressupunham a presença do K no solo (primeiros 30 cm, de 30 a 60 cm e de 60 a 90 cm de profundidade), uma vez que o mesmo foi determinado indiretamente com base na análise do marcador Rb na planta (SILVA et al., 2011).

2.3. Transferência relativa do K do resíduo da soja para as plantas em sucessão

A transferência relativa de K (TRK) ou a reciclagem desse nutriente contido no resíduo da soja proveniente da absorção dos primeiros 30 cm de profundidade do solo, com base na análise de Rb nas plantas da segunda safra foi obtida conforme apresentada a seguir:

$$\text{TRK-sp (\%)} = [\text{RbP-sp} / (\text{RbR-sp} + \text{RbR-30} + \text{RbR-60})] \times 100$$

em que: TRK-sp (%) corresponde a transferência do Rb ciclado do resíduo da soja proveniente da aplicação do mesmo feita na superfície do solo; RbP-sp (mg kg⁻¹) é a quantidade de Rb na planta da segunda safra ciclado do resíduo de soja, em que a aplicação do mesmo foi feita na superfície do solo; RbR-sp (mg kg⁻¹) é a quantidade de Rb no resíduo da soja, em que o mesmo foi aplicado na superfície do solo; RbR-30 (mg kg⁻¹) é a quantidade de Rb no resíduo da soja, em que o mesmo foi aplicado a 30 cm de profundidade no solo; RbR-60 (mg kg⁻¹) corresponde a quantidade de Rb no resíduo da soja, em que o mesmo foi aplicado a 60 cm de profundidade no solo.

A transferência relativa de K (TRK) ou a reciclagem desse nutriente contido no resíduo da soja proveniente da absorção da camada entre 30 cm e 60 cm de profundidade do solo, com base na análise de Rb nas plantas da segunda safra foi obtida conforme apresentada a seguir:

$$\text{TRK-30 (\%)} = [\text{RbP-30} / (\text{RbR-sp} + \text{RbR-30} + \text{RbR-60})] \times 100$$

em que: TRK-30 (%) corresponde a transferência do Rb ciclado do resíduo da soja proveniente da aplicação do mesmo feita a 30 cm de profundidade no solo; RbP-30 (mg kg⁻¹) é a quantidade de Rb na planta da segunda safra ciclado do resíduo da soja, em que a aplicação do mesmo foi feita a 30 cm de profundidade no solo; RbR-sp (mg kg⁻¹) é a quantidade de Rb no resíduo da soja, em que o mesmo foi aplicado na superfície do solo; RbR-30 (mg kg⁻¹) é a quantidade de Rb no resíduo da soja, em que o mesmo foi aplicado a 30 cm de profundidade no solo; RbR-60 (mg kg⁻¹) corresponde a quantidade de Rb no resíduo da soja, em que o mesmo foi aplicado a 60 cm de profundidade no solo.

A transferência relativa de K (TRK) ou a reciclagem desse nutriente contido no resíduo da soja proveniente da absorção da camada entre 60 cm e 90 cm de profundidade do solo, com base na análise de Rb nas plantas da segunda safra foi obtida conforme apresentada a seguir:

$$\text{TRK-60 (\%)} = [\text{RbP-60} / (\text{RbR-sp} + \text{RbR-30} + \text{RbR-60})] \times 100$$

em que: TRK-60 (%) corresponde a transferência do Rb ciclado do resíduo da soja proveniente da aplicação do mesmo feita a 60 cm de profundidade no solo; RbP-60 (mg kg^{-1}) é a quantidade de Rb na planta da segunda safra ciclado do resíduo da soja, em que a aplicação do mesmo foi feita a 60 cm de profundidade no solo; RbR-sp (mg kg^{-1}) é a quantidade de Rb no resíduo da soja, em que o mesmo foi aplicado na superfície do solo; RbR-30 (mg kg^{-1}) é a quantidade de Rb no resíduo da soja, em que o mesmo foi aplicado a 30 cm de profundidade no solo; RbR-60 (mg kg^{-1}) corresponde a quantidade de Rb no resíduo da soja, em que o mesmo foi aplicado a 60 cm de profundidade no solo.

2.4. Análises Estatísticas

Os resultados foram submetidos ao teste de normalidade e homogeneidade de variância e, se necessário, transformados pelo lambda conveniente (PROC TRANSREG). Posteriormente, foi realizada a análise de variância (ANOVA) pelo teste F a 5% de probabilidade (PROC GLM). Foram considerados efeitos fixos (sistema de produção, profundidade de aplicação do Rb e sua interação). Caso a hipótese de nulidade seja rejeitada, as médias foram comparadas pelo teste de comparação de médias LSD, com $p \leq 0,05$ para o sistema de produção e a profundidade de recuperação de Rb. Os dados foram analisados por meio do software SAS - System (SAS Institute, 2009).

3. RESULTADOS

3.1. Produtividade de grãos e de biomassa seca, e K acumulado nas plantas

A produtividade de grãos não diferiu estatisticamente, cuja média para soja foi 3,9 Mg ha⁻¹ de grãos, 3,9 Mg ha⁻¹ para o milho em monocultivo e 4,1 Mg ha⁻¹ no consórcio. A produção de massa de matéria seca de soja (MSo) e a quantidade total de K acumulado na soja (KSo) também não diferiram estatisticamente, cujas médias foram iguais a 8,5 Mg ha⁻¹ e 221 kg ha⁻¹ de K, nessa ordem (Tabela 2).

A massa de matéria seca das culturas da segunda safra (M2S), do sistema de produção (MST), o K total acumulado nas plantas da segunda safra (K2S) e o K total acumulado do sistema de produção (KT) diferiram estatisticamente (Tabela 2). A maior quantidade de biomassa na segunda safra foi obtida para milho-braquiária, a qual não diferiu da braquiária, média de 9,5 Mg ha⁻¹, e ambas foram superiores ao milho (7,6 Mg ha⁻¹). A braquiária acumulou maior quantidade de K (358 kg ha⁻¹), seguida pelo consórcio (184 kg ha⁻¹) e milho (55 kg ha⁻¹). As maiores produções de MST foram obtidos nos sistemas de produção soja/braquiária e soja/milho-braquiária, com média de 18,5 Mg ha⁻¹, seguida pelo sistema soja/milho e soja em monocultivo (Tabela 2).

Tabela 2. Produção de matéria seca de soja (MSo, Mg ha⁻¹), matéria seca das plantas da segunda safra (M2S, Mg ha⁻¹), massa seca total da soja mais da cultura da segunda safra (MST, Mg ha⁻¹), K acumulado na soja (KSo, kg ha⁻¹), nas plantas da segunda safra (K2S, kg ha⁻¹) e o K total acumulado na soja e na cultura da segunda safra (KT, kg ha⁻¹)

Sistema de produção Safr/Seg. safra	MSo	M2S	MST (MSo + M2S)	KSo	K2S	KT (KSo + K2S)
	-----Mg ha ⁻¹ -----			-----kg ha ⁻¹ -----		
Soja/Braquiária	8,8	9,5a	18,3a	229	358a	586a
Soja/Milho-Braq.	8,4	10,4a	18,8a	215	184b	398b
Soja/Milho	8,3	7,6b	15,9b	220	55c	275c
Soja	8,4	-	8,4c	219	-	219d
Média	8,5	9,1	15,3	221	199	370
F ¹	0,78 ^{ns}	0,003 ^{**}	<0,0001 ^{***}	0,86 ^{ns}	<0,0001 ^{***}	<0,0001 ^{***}
CV (%) ²	8,9	7,9	5,5	10,7	7,9	7,9

⁽¹⁾ valor do teste F; ⁽²⁾ coeficiente de variação; ** significativo a 1%; *** significativo a menos de 0,1%; ^{ns}: não significativo. Médias seguidas da mesma letra minúscula nas colunas não diferem pelo teste LSD a p ≤ 0,05

O acúmulo total de K foi maior para no sistema soja-forrageira (586 kg ha⁻¹), seguido pelo sistema soja/milho-braquiária (398 kg ha⁻¹), enquanto no cultivo exclusivo de soja foi o que menos acumulou (219 kg ha⁻¹).

3.2. Contribuição relativa do K de diferentes camadas do solo para o conteúdo na soja

Na soja, a contribuição relativa do K (CRK) absorvido de diferentes zonas do solo foi superior para a camada superficial do solo, a qual representou a maior parte do conteúdo total de K na planta (129

kg ha⁻¹), equivalente a 60% do KT acumulado. Na sequência, o K proveniente da camada entre 30 cm e 60 cm de profundidade contribuiu com 52 kg ha⁻¹ (24%), e o K presente entre 60 cm e 90 cm de profundidade colaborou com mais 36 kg ha⁻¹ ou 16% do conteúdo de KT (Figura 6).

Figura 6. Contribuição relativa do K presente em diferentes profundidades no solo, para o conteúdo de K na planta e nos grãos. Médias seguidas da mesma letra minúscula para planta e grãos não diferem pelo teste LSD a $p \leq 0,05$

Da quantidade total de K acumulada pela soja, 56% foi encontrada na biomassa da parte aérea (151 kg ha⁻¹), de onde retornará ao solo no final do ciclo, enquanto o restante será exportado pelos grãos (44% ou 66 kg ha⁻¹).

3.3. Contribuição relativa do K de diferentes camadas do solo para as plantas em sucessão

A contribuição relativa de K (CRK) de as camadas do solo às plantas cultivadas na segunda safra, foi significativa apenas para o milho (Figura 7 C). A forrageira e o milho-braquiária, nessa ordem, acumularam, em média, 219 kg ha⁻¹ e 164 kg ha⁻¹ de K das três profundidades avaliadas.

A braquiária absorveu e acumulou na biomassa da parte aérea 74% (166 kg ha⁻¹) do K das duas camadas subsuperficiais (30 a 60 cm e 60 a 90 cm de profundidade) (Figura 7 A). No milho-braquiária, 71% (117 kg ha⁻¹) da contribuição relativa de K também originaram das mesmas camadas subsuperficiais (Figura 7 B), enquanto o milho obteve 81% do K (43 kg ha⁻¹) da zona abaixo de 30 cm de profundidade (Figura 7 C), a semelhança da forrageira e do milho-braquiária.

Figura 7. Contribuição relativa do K presente em diferentes profundidades no solo para o conteúdo de K nas plantas da segunda safra - braquiária (A), milho-braquiária (B) e milho (C). O teste LSD compara as culturas de segunda safra

3.4. Transferência relativa de K ou reciclagem do resíduo da soja para as plantas em sucessão

A transferência de K do resíduo da soja as culturas em sucessão, diferiu na forrageira e no milho-braquiária. Em média, a braquiária reciclou 139 kg ha⁻¹ do K contido no resíduo da soja, o que representa a transferência de 84% do total acumulado. No milho os valores observados foram baixos, não significativos em relação à camada de origem do K presente no resíduo (Tabela 3).

Tabela 3. Transferência de K do resíduo da soja para as culturas na segunda safra: braquiária em monocultivo, consórcio entre milho-braquiária e milho

Posição (cm)	Braquiária kg ha ⁻¹	Milho-Braquiária			Milho
		Braquiária	PA + Grãos	Total	PA + Grãos
			kg ha ⁻¹		kg ha ⁻¹
Resíduo soja-sp	71a	10a	1	11a	2
Resíduo soja-30	40b	4b	1	5b	1
Resíduo soja-60	28b	4b	1	5b	1
Total	139	18	3	21	4
F ¹	0,03*	0,03*	0,64 ^{ns}	0,02*	0,70 ^{ns}
CV (%) ²	37,5	40,6	57,2	21,7	135,1

⁽¹⁾ valor do teste F; ⁽²⁾ coeficiente de variação; *significativo a 5%; ^{ns}não significativo. Médias seguidas da mesma letra minúscula nas colunas não diferem pelo teste LSD a p ≤ 0,05

Do total de K reciclado pela braquiária, a maior parte 71 kg ha⁻¹ (44%) é oriunda do K acumulado na parte aérea da soja que fora absorvido pela leguminosa dos primeiros 30 cm de profundidade do solo. Resultado semelhante foi observado no consórcio, com maior reciclagem do K do resíduo da soja também absorvido da camada superficial - 11 kg ha⁻¹ (7%). O milho reciclou apenas 4 kg ha⁻¹ do K contido no resíduo de soja, proveniente das três zonas no solo em que a leguminosa absorveu este nutriente.

3.5. Contribuição relativa do K proveniente do solo, ciclado pela soja às plantas em sucessão

A camada de onde foi absorvido o K diferiu entre as plantas da segunda safra e entre as camadas de origem do nutriente (Figura 8). Entre as plantas, a braquiária acumulou em média 119 kg ha⁻¹ (das três profundidades), seguida pelo milho-braquiária e por fim o milho, independente da origem do nutriente, se nativo do solo ou proveniente do resíduo da soja. A braquiária acumulou cerca de 51% a mais de K em relação ao milho-braquiária, e o consórcio 30% a mais do que o milho (Figura 8).

As camadas subsuperficiais do solo (30 a 60 cm e 60 a 90 cm de profundidade) foram as que mais contribuíram para o conteúdo de K, independentemente das culturas em sucessão à soja, com médias

de 74 kg ha⁻¹ da zona entre 30 cm e 60 cm de profundidade e 75 kg ha⁻¹ da zona abaixo da mesma (60 a 90 cm de profundidade).

Figura 8. CRK independentemente da sua origem solo ou resíduo de soja as plantas cultivadas na segunda safra (milho, braquiária e milho-braquiária). O teste LSD compara as culturas de segunda safra e as posições de origem do Keq

3.6. Contribuição relativa do K proveniente do solo e do resíduo da soja para o sistema de produção

Houve diferenças estatísticas para o sistema de produção (safra/segunda safra) para a zona de origem do K do solo, e para a interação entre o sistema de produção e a zona de absorção. O sistema de produção que mais acumulou este nutriente foi soja/braquiária, com média de 195 kg ha⁻¹ considerando as três camadas (Figura 9), e não menos importante foi o sistema de produção soja/milho-braquiária com média de 133 kg ha⁻¹. Não diferiram o sistema soja/milho e monocultivo de soja, com média de apenas 83 kg ha⁻¹ de K acumulado das três profundidades avaliadas.

A camada superficial do solo foi aquela que mais contribuiu para o conteúdo de K no sistema de produção, com média de 152 kg ha⁻¹. A absorção do nutriente da região entre 30 cm e 60 cm não difere da absorção proveniente da zona entre 60 cm e 90 cm de profundidade, cuja média foi igual a 114 kg ha⁻¹. Ainda que sejam semelhantes, a contribuição destas duas camadas em subsuperfície representaram 56% da absorção total do K para os sistemas de produção avaliados na presente pesquisa.

O acúmulo de K proveniente dos primeiros 30 cm de solo foi semelhante no sistema de produção soja/braquiária, soja/milho-braquiária e soja/milho, e este foi semelhante ao monocultivo de soja. A região entre 30 cm e 60 cm de profundidade contribuiu com mais K no sistema de produção soja/braquiária, seguida pela soja/milho-braquiária, sem diferir entre os sistemas soja/milho e soja em

monocultivo. A profundidade abaixo de 60 cm apresentou o mesmo comportamento que foi observado para a zona entre 30 cm e 60 cm de profundidade.

Figura 9. CRK independentemente da origem do nutriente (solo ou resíduo da soja) para os sistemas de produção (safra/segunda safra). O teste LSD compara os sistemas de produção dentro de cada profundidade de origem do K do solo

4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A realização da segunda safra depende da época de semeadura, em razão da disponibilidade de água, a qual depende do volume e distribuição de chuvas durante o ciclo da cultura. Este fator pode influenciar a escolha de uma ou outra cultura, sem desconsiderar o interesse do agricultor.

Na presente pesquisa, na segunda safra, a temperatura média foi 24 °C e a precipitação acumulada foi de 560 mm. As plantas cultivadas nesta época - milho, braquiária e milho-braquiária passaram por um longo período de estresse hídrico, como indica o balanço hídrico (Figura 2). O veranico é uma condição climática que pode acontecer com frequência na agricultura, e variar de intensidade de um ano para outro. Na presente pesquisa o mesmo durou 30 dias seguidos.

As culturas em sucessão a soja apresentaram desempenhos diferentes na produção de biomassa seca, e assim também aconteceu com o acúmulo de K. A quantidade de biomassa está diretamente relacionada com a produção de fotoassimilados, e, para a semeadura direta, a quantidade de resíduo vegetal é importante, pois protege o solo do impacto da chuva e reduz a perda de água por evaporação. Ainda, a contribuição de as zonas do solo para o K acumulado na biomassa e/ou nos grãos das plantas dessa época (segunda safra) é fundamental para manter este nutriente no sistema de produção. Assim, o risco de o K ser lixiviado é bem menor, do que se estivesse no solo (CRUZ et al., 2013), principalmente nas regiões abaixo de 60 cm de profundidade.

4.1. Produção de matéria seca e acúmulo de K pela soja e culturas em sucessão

A produção de biomassa pela soja e o acúmulo de K foram semelhantes em todos os sistemas de produção, o que se explica pela não variação das condições climáticas, de os atributos do solo e manejo da cultura. A produtividade de 3,9 Mg ha⁻¹ de soja foi superior à média nacional de 2,9 Mg ha⁻¹ (CONAB, 2017) e semelhante ao que fora obtido em outras pesquisas (LACERDA et al., 2015; FREDDI et al., 2017; MARTINS et al., 2017) em condições semelhantes a este trabalho.

Nas plantas em sucessão a soja variou a produção de biomassa seca e o acúmulo de K no milho, braquiária e milho-braquiária. A produtividade do milho (4,0 Mg ha⁻¹) e a quantidade de biomassa total (9,1 Mg ha⁻¹) ficaram abaixo do esperado, conforme relatado por outros pesquisadores, para os quais a produtividade média foi 12,9 Mg ha⁻¹ (MARTINS et al., 2017; CRUZ et al., 2013). A baixa produção de milho (grãos e parte aérea) se deu por causa da má distribuição da precipitação pluvial durante o ciclo da cultura (Figuras 1 e 2, Tabela 2). Mesmo nestas condições, a braquiária produziu 9,5 Mg ha⁻¹ de biomassa seca e acumulou 358 kg ha⁻¹ de K, como fora obtido por Pacheco et al. (2013). A forrageira, desde que estabelecida tem grande potencial de produção de matéria vegetal, em razão de a capacidade de explorar maior volume de solo, inclusive em profundidade. O estabelecimento desta espécie não foi comprometido, haja vista que houve excedente hídrico nos dias subsequentes à semeadura (Figura 2). O milho-braquiária, mesmo com o crescimento da forrageira prejudicado pelo sombreamento inicial

proporcionado pelo milho, produziu 3,1 Mg ha⁻¹ de biomassa seca, enquanto Mendonça et al. (2015) obtiveram uma produção de 4,1 Mg ha⁻¹ também na segunda safra, mas irrigado.

4.2. Contribuição relativa de K de as diferentes zonas do solo para a soja e plantas em sucessão

A soja absorveu, predominantemente, K dos primeiros 30 cm de solo (60% ou 129 kg ha⁻¹), enquanto da zona abaixo de 60 cm de profundidade foi assimilado apenas 16% (36 kg ha⁻¹) da quantidade total acumulada durante o ciclo. Este fato caracteriza esta espécie como pouco cicladora do nutriente presente em profundidade no solo, uma vez que esta planta possui raízes superficiais (PIVETTA et al., 2011), comprovada na presente pesquisa por meio da contribuição relativa de as camadas do solo (Figura 6). Este conhecimento era até então desconhecido na literatura.

A soja pouco contribuirá para a absorção de K presente em subsuperfície, ainda que não haja impedimento ao crescimento radicular. Os cultivares precoces com maior potencial produtivo interfere na relação fonte dreno, e a duração da fase vegetativa será menor (EGLI, 2010), época em que o sistema radicular mais se desenvolve, antes de a parte reprodutiva ser o maior dreno de fotoassimilados. Este fato explica em grande parte o predomínio da absorção de K dos primeiros 30 cm de profundidade do solo. O risco de o K presente nessa zona ser lixiviado é pequeno, comparado àquele presente na região abaixo de 60 cm de profundidade, de onde a leguminosa foi pouco efetiva na absorção.

Frente a esse cenário, é interessante que a planta que compoñha o sistema de produção em sucessão a soja produza muita biomassa, seja exigente em K e explore o solo em profundidade, a fim de absorver maior quantidade deste nutriente, diminuir o risco de perda e, ainda, que sirva para proteger o solo em semeadura direta e/ou pastejo animal.

Dos cultivos feitos na segunda safra, as maiores contribuições para o conteúdo de K nas plantas foram proporcionadas pelas zonas em subsuperfície, abaixo de 30 cm de profundidade no solo (Figura 7). O milho absorveu 81% do K de estas zonas, e assim justifica considerá-lo como planta de sistema radicular profundo (BASSOI et al., 1994). Na presente pesquisa, o estresse hídrico, evidenciado no balanço hídrico (Figura 2), também pode ter estimulado o crescimento de raízes em profundidade. Com base nos resultados de absorção de K obtidos na presente pesquisa pode-se admitir que as plantas do consórcio (milho-braquiária) exploram de forma mais homogênea o perfil do solo (Figura 8), pois do total de K acumulado nas duas espécies, 69% é oriunda da camada abaixo de 30 cm de profundidade e 31% da camada superficial. Esta dedução foi feita porque o contato do K com as raízes é, basicamente, por difusão. A produção de milho no consórcio tem importância econômica direta e indireta por acumular K, e preservar o solo da erosão, em razão da proteção pela biomassa residual. O uso desta espécie é importante também no aspecto ambiental – pela recuperação do K de subsuperfície, passível de ser lixiviado (Tabela 2).

A braquiária também possui sistema radicular em profundidade (MOREIRA et al., 2005), como comprovados pela absorção de 74% do K acumulado (166 kg ha^{-1}) das camadas entre 30 cm e 60 cm e entre 60 cm e 90 cm de profundidade no solo (Figura 8). Portanto, esta espécie deveria, sempre que viável, compor os sistemas de produção, uma vez que apenas o K na solução e o K trocável estão disponíveis às plantas. A absorção e a perda desse nutriente precisa ser reposta por meio da fertilização, haja vista que no solos tropicais não há fonte mineral de K, seja de minerais primários (feldspatos, muscovita e biotita) e/ou de minerais secundários (ilita e vermiculita) (RAIJ, 2011).

O K contido na biomassa da parte aérea da soja (Figura 6) retorna à superfície do solo, por pluviolixiviação ou degradação da biomassa, de onde pode lixiviar no perfil do solo pela infiltração de água ou ser reciclado pelas plantas em sucessão a leguminosa, como pode ser comprovado pelos dados da tabela 4.

Os três cenários para plantas cultivadas na segunda safra proporcionaram maiores produções de biomassa seca e acúmulo de K, em relação ao monocultivo de soja. No entanto, no caso de as condições climáticas e preço do produto favorecer o cultivo de milho, os resultados da presente pesquisa evidenciam que o consórcio (milho-braquiária) é uma opção. Se as condições desfavorecerem a opção pela produção do cereal, os resultados comprovam que o cultivo da braquiária em monocultivo é o melhor sistema de produção (soja/braquiária), seja para a produção de biomassa vegetal para fins de semeadura direta e/ou para pastejo animal, bem como para o acúmulo de K na planta proveniente das camadas subsuperficiais do solo.

5. CONCLUSÕES

A soja absorve a maior parte quantidade do K, contido na sua biomassa, dos primeiros 30 cm de solo (60%), e as plantas em sucessão das zonas subsuperficiais, abaixo de 30 cm de profundidade (braquiária – 74%, milho-braquiária – 71% e milho – 81%).

O sistema de produção soja/braquiária é a opção indicada para a produção de biomassa vegetal necessária à conservação do solo em semeadura direta.

O K contido na biomassa da parte aérea da soja é, predominantemente, recuperado pela braquiária (84%), seguida pelo consórcio milho-braquiária (13%) e o milho (2,5%).

REFERÊNCIAS

- BASSOI, L.H.; FANTE JÚNIOR, L.; JORGE, L.A.C.; CRESTANA, S.; REICHARDT, K. Distribuição do sistema radicular do milho em Terra Roxa Estruturada Latossólica: II. Comparação entre cultura irrigada e fertirrigada. **Scientia Agrícola**, v.51, n.3, p. 541-548, 1994.
- BOER, C.A.; ASSIS, R.L.; SILVA, G.P.; BRAZ, A.J.B.P.; BARROSO, A.L.L.; CARGNELUTTI FILHO, A.; PIRES, F.R.; Biomassa, decomposição e cobertura do solo ocasionada por resíduos culturais de três espécies vegetais na região Centro-Oeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, n.2, p.843-851, 2007.
- CALONEGO, J.C.; GIL, F.C.; ROCCO, V.F.; SANTOS, E.A. Persistência e liberação de nutrientes da palha de milho, braquiária e labe-labe. **Bioscience Journal**, v.28, n.5, p. 770-781, 2012.
- CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira: grãos**. Décimo segundo levantamento, setembro/2017. Brasília, 2017. 158p.
- CRUZ, S.C.S.; BICUDO, S.J.; MACHADO, C.G.; PEREIRA, F. R.S.; BRACHTVOGEL, E. L. Bromatologia e nutrição do milho submetido à doses de potássio em sistema de integração lavoura-pecuária. **Revista Agrotecnologia**, v.4, n.1, p.1-16, 2013.
- DNPM - Departamento Nacional de Produção Mineral. **Sumário Mineral**. 2014. 141p.
- DUDA, G.P.; GUERRA, J.G.M.; MONTEIRO, M.T.; DE-POLLI, H.; TEIXEIRA, M.G. Perennial herbaceous legumes as live soil mulches and their effects on C, N and P of the microbial biomass. **Scientia Agrícola**, v.60, p.139-147, 2003.
- EGLI, D.B. **Soybean yield physiology: principles and processes of yield production**. In: SINGH, Guriqbal (Ed.). The soybean: botany, production and uses. Ludhiana: CABI, 2010. p. 113-141.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. 2013. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3ª ed. EMBRAPA, Rio de Janeiro, Brasil. 353p.
- ERDEI, L.; TRIVEDI, S. Caesium/potassium selectivity in wheat and lettuce of different potassium status. **Journal of Plant Physiology**, v.138, n.6, p. 696-699, 1991.
- FEHR, W.R.; CAVINESS, C.E. **Stages of soybean development**. Special Report nº. 80. Iowa State University, 1977. 12p.
- FERREIRA, E.V.O.; ANGHINONI, I.; ANDRIGHETTI, M.H.; MARTINS, A.P.; CARVALHO, P.C.F. Ciclagem e balanço de potássio e produtividade de soja na integração lavoura-pecuária sob semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, n.1, p. 161-169, 2011.
- FOLONI, J.S.S.; LIMA, S.D.; BÜLL, L.T. Crescimento aéreo e radicular da soja e de plantas de cobertura em camadas compactadas de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.30, n.1, p. 49-57, 2006.
- FREDDI, O.S.; TAVANTI, R.F.R.; SOARES, M.B.; ALMEIDA, F.T.; PERES, F.S.C. Qualidade físico-química de um latossolo sob semeadura direta e sucessão soja-milho no ecótono Cerrado/Amazônia. **Revista Caatinga**, v.30, n.4, p. 991-1000, 2017.
- GREGORY, P.J. Crescimiento y funcionamiento de las raíces. In: WILD, A. (Coord.). **Condiciones del suelo y desarrollo de las plantas según Russel**. Madrid: Mundi-Prensa, 1992. p.121-175.
- LACERDA, J.J.J.; RESENDE, Á.V.; FURTINI NETO, A.E.; HICKMANN, C.; CONCEIÇÃO, O. P. Adubação, produtividade e rentabilidade da rotação entre soja e milho em solo com fertilidade construída. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.50, n.9, p.769-778, 2015.

- MARTINS, D.C.; RESENDE, Á.V.; GALVÃO, J.C.C.; SIMÃO, E.D.P.; FERREIRA, J.P.D.C.; ALMEIDA, G. D. O. Organomineral phosphorus fertilization in the production of corn, soybean and bean cultivated in succession. **American Journal of Plant Sciences**, v.8, n.10, p.2407-2421, 2017.
- MENDONÇA, V.Z.; MELLO, L.M.M.; ANDREOTTI, M.; PARIZ, C.M.; YANO, É.H.; LAGES, F.C.B. Liberação de nutrientes da palhada de forrageiras consorciadas com milho e sucessão com soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.39, n.1, p. 183-193, 2015.
- MENZEL, R.G.; HEALD, W.R. Distribution of potassium, rubidium, cesium, calcium and strontium within plants grown in nutrient solutions. **Soil Science**, v.80, n.4, p. 287-294, 1955.
- MIGLIAVACCA, R.A. **Caracterização do uso do rubídio como marcador do potássio no milho (*Zea mays* L.)**. 2015. 76 p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2015.
- MOREIRA, J.A.A.; OLIVEIRA, I.P.; GUIMARÃES, C.M.; STONE, L.F. Atributos químicos e físicos de um latossolo vermelho distrófico sob pastagens recuperada e degradada. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.35, n.3, p. 155-161, 2005.
- PACHECO, L.P.; BARBOSA, J.M.; LEANDRO, W.M.; MACHADO, P.L.O.A.; ASSIS, R.L.; MADARI, B.E.; PETTER, F.A. Ciclagem de nutrientes por plantas de cobertura e produtividade de soja e arroz em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.48, n.9, p. 1228-1236, 2013.
- PIVETTA, L.A.; CASTOLDI, G.; SANTOS, G.; ROSOLEM, C.A. Crescimento e atividade de raízes de soja em função do sistema de produção. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.46, n.11, p. 1547-1554, 2011.
- RAIJ, B. V. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. Piracicaba: IPNI, 2011. 420 p.
- RAIJ, B.V.; ANDRADE, J.D.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2001. 285 p.
- RITCHIE, S.W.; HANWAY, J.J.; BENSON, G.O. **How a corn plant develops**. Special Report nº. 48. Iowa State University, 1992. 21p.
- SAS INSTITUTE. **The SAS system for Windows**: v. 9.2. Cary, 2009.
- SILVA, A.F.; LAZARINI, E. Doses e épocas de aplicação de potássio na cultura da soja em sucessão a plantas de cobertura. **Semina: Ciências Agrárias**, v.35, n.1, p. 179-192, 2014.
- SILVA, E.V.; BOUILLET, J.P.; GONÇALVES, J.L.M.; ABREU JUNIOR, C.H.; TRIVELIN, P.C.O.; HINSINGER, P.; JOURDAN, C.; NOUVELLON, Y.; STAPE, J.L.; LACLAU, J.P. Functional specialization of *Eucalyptus* fine roots: contrasting potential uptake rates for nitrogen, potassium and calcium tracers at varying soil depths. **Functional Ecology**, v.25, n.5, p. 996-1006, 2011.
- SOUSA, D.M.G.; LOBATO, E. **Cerrado: correção do solo e adubação**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2004. 416p.
- TEZOTTO, T.; FAVARIN, J.L.; NETO, A.P.; GRATÃO, P.L.; AZEVEDO, R.A.; MAZZAFERA, P. Simple procedure for nutrient analysis of coffee plant with energy dispersive X-ray fluorescence spectrometry (EDXRF). **Scientia Agrícola (Impresso)**, v.70, n.4, p. 263-267, 2013.