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

**Eficiência de uso do K em razão do sistema de adubação na
rotação aveia-milho**

Bruno Cocco Lago

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

**Piracicaba
2014**

Bruno Cocco Lago
Engenheiro Agrônomo

**Eficiência de uso do K em razão do sistema de adubação na rotação aveia-
milho**

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
2014

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA - ESALQ/USP**

Lago, Bruno Cocco

Eficiência de uso do K em razão do sistema de adubação na rotação aveia-milho / Bruno Cocco Lago. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2014.
40 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2013.
Bibliografia.

1. *Zea mays* L. 2. *Avena sativa* 3. *Avena strigosa* 4. Traçador ⁸⁵Rb I. Título

CDD 631.582
L177e

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor"

AGRADECIMENTOS

A Deus, por iluminar meu caminho.

Aos meus pais e família, por todo amor e incentivo.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pela concessão de bolsa de estudos.

Ao Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia do Departamento de Produção Vegetal, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – USP, pelo apoio e pela oportunidade de realizar o curso.

Ao meu orientador, Professor José Laércio Favarin, pela confiança, paciência, motivação, compreensão, amizade e ensinamentos durante estes anos do mestrado.

Agradeço, também, a sua esposa Maria da Graça Favarin e seu filho Felipe Mateus Favarin, por receberem todos os orientados de braços abertos, com todo carinho.

Aos amigos do grupo de Ecofisiologia e nutrição de plantas em sistemas de produção (ENUSP): Adriene Woods Pedrosa, Ana Paula Neto, André Borja Reis (Dipé), Clovis Pierozan Junior (Ganta), Felipe Brendler Oliveira (K-s-ktinha), Pedro Paulo Teixeira Carvalho (Leva-Prego), Rafaela Alenbrant Migliavacca (Mastite), Rodrigo Estavam Munhoz de Almeida (Txarli-Braun), Silas Maciel de Oliveira (Laskô), Tiago Tezotto (Sauípe); não preciso mencionar o quanto cada um foi e, continua sendo, importante ao grupo e a minha pesquisa. Agradeço pela amizade, paciência, colaboração e disposição nesses anos.

Aos estagiários do grupo ENUSP, pelas amizades e colaborações.

Ao Dr. José Luiz Motta de Almeida por disponibilizar recursos, e a Fazenda Serrado Chão Quente, para realizar o experimento em Taquarituba/SP, além-claro pelas sábias lições de vida, assim como aos funcionários da propriedade.

Ao produtor Evaldo Klein e família, pelo interesse na pesquisa, e disponibilizar a Fazenda Boa Esperança, recursos, recepção e acomodação em Guarapuava/PR. Assim como, aos funcionários sempre dispostos, os quais não mediram esforços para que a pesquisa fosse realizada.

À Maíra Paes Lacerda, pela compreensão, dedicação e companheirismo.

À Ana Paula Schwantes e Fernanda Schwantes, pela amizade.

À secretária da PPG-Fitotecnia Luciane Aparecida Lopes Toledo, pela amizade e paciência, sempre disposta a prestar os esclarecimentos necessários.

Aos estagiários e coordenadores do Grupo de Experimentação Agrícola (GEA) pela amizade e ajuda.

Aos funcionários do Departamento de Produção Vegetal, do setor Agricultura, pela amizade e apoio.

À bibliotecária Eliana Maria Garcia e demais funcionários pela colaboração na padronização e auxílio na submissão da dissertação.

À Rep. do Matusa e a República Copacabana pelas amizades.

Aos colegas da 79ª Turma de Agronomia da UFSM, pelas amizades.

A todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram com a realização desta pesquisa.

Muito Obrigado!

SUMÁRIO

RESUMO.....	7
ABSTRACT	9
1 INTRODUÇÃO	11
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	21
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	27
5 CONCLUSÃO.....	35
REFERÊNCIAS.....	37

RESUMO

Eficiência de uso do K em razão do sistema de adubação na rotação aveia-milho

O potássio (K) é o segundo nutriente mais requerido pelo milho. Os produtores de milho em sistema de plantio direto (SPD) antecipam na aveia a dose de K que seria aplicada no milho. O uso da adubação antecipada se deve a redução de custo da semeadura, e a possibilidade de instalar a cultura de acordo com o zoneamento agroclimático. Esta pesquisa foi realizada com o objetivo de avaliar a eficiência de uso do K proveniente do fertilizante, por meio do marcador rubídio (^{85}Rb), em razão dos sistemas de adubação potássica na rotação aveia-milho. Os experimentos foram realizados em Guarapuava-PR e Taquarituba-SP, entre abril de 2012 e abril de 2013, em solos com alto teor de K. A eficiência de uso do K proveniente do fertilizante foi determinada nos seguintes sistemas de adubação: K no perfilhamento da aveia; K em pré-semeadura do milho; K na semeadura do milho; K em cobertura no estágio V3; e K em cobertura nos estádios V3 (50%) e V6 (50%). Os sistemas de adubação foram casualizados em quatro blocos, nos dois experimentos. A maior eficiência de uso do K foi obtida no sistema de adubação em pré-semeadura do milho, entre 15 e 30 dias, sem prejuízo da produtividade.

Palavras-chave: *Zea mays* L.; *Avena sativa*; *Avena strigosa*; Traçador Rubídio (^{85}Rb)

ABSTRACT

K use efficiency according to fertilization system in oat-corn rotation

Potassium (K) is the second most required nutrient for corn. Farmers that grow corn in no-tillage system (NTS) have been anticipated on oats crop the K fertilizer amount that should be applied in corn crop. The adoption of early fertilization system is related to cost reduction and the possibility of the main crop establishment in the period recommended by the agroclimatic zoning. This research aims to evaluate the K use efficiency from the fertilizer with the tracer Rubidium (^{85}Rb), according to potassium fertilization systems in oat-corn rotation. The experiments were conducted in Guarapuava-PR and Taquarituba-SP between April 2012 and April 2013, in soils with high content of K. Potassium use efficiency from the fertilizer was determined in the following fertilization systems: K on oat tillering, K in corn pre-sowing, K in corn sowing, K topdressing in stage V3, and K topdressing in stages V3 (50%) and V6 (50%). The fertilization systems were randomized into four blocks, in both experiments. The system of K fertilization was applied pre-sowing corn, between 15 and 30 days, was more efficient in the use of K from the fertilizer without damaging productivity.

Keywords: *Zea mays* L.; *Avena sativa*; *Avena strigosa*; Rubidium (^{85}Rb) tracer

1 INTRODUÇÃO

O íon potássio (K) é abundante na planta, e o segundo nutriente mais requerido pelo milho, depois do nitrogênio. O K é móvel porque não faz parte de nenhum composto orgânico, o que facilita a ciclagem rápida entre planta e solo.

A quantidade de K extraída pelo milho aumenta com a produtividade. Em lavouras de mais de 10 Mg ha⁻¹ a extração deste nutriente ultrapassa 160 kg ha⁻¹, dos quais entre 20% e 30% é exportado nos grãos, e o restante permanece nos resíduos.

No sistema de adubação convencional recomenda-se até 50 kg ha⁻¹ de K₂O no sulco de semeadura, distribuída ao lado e abaixo da semente (RAIJ et al., 1997), e o restante é fornecido em cobertura até o estágio de quatro folhas (V4) a seis folhas expandidas (V6) do milho. O K aplicado no sulco está bem mais propenso à lixiviação, em razão do aumento do teor na solução em volume restrito de solo.

Outro sistema de adubação é a aplicação feita a lanço, que em geral realiza-se em pré-semeadura em solos de textura argilosa e muito argilosa, e em pós-semeadura em solos de textura média a arenosa. Para Raij et al. (1997) este sistema de adubação pode ser praticado desde que o solo apresente teor adequado de K trocável, entre 1,6 mmol_c dm⁻³ e 3 mmol_c dm⁻³, para que não haja prejuízo à produtividade.

Na região sul e centro-oeste do Brasil, os produtores antecipam a aplicação do K a ser feita no milho, na cultura de entressafra ou outono/inverno, que na maioria das vezes são gramíneas, como a aveia, o trigo e o milheto. Neste sistema de adubação, a dose de K para o milho é aplicada a lanço no perfilhamento da aveia ou na pré-semeadura do milho.

No sistema de produção em plantio direto (SPD) o solo permanece úmido por mais tempo, em consequência da presença de resíduos vegetais na superfície, que reduz o aquecimento do solo e, assim, se perde menos água por evaporação. Neste ambiente, por sua vez, o risco de lixiviação do K aumenta. Entre os benefícios do SPD está o incremento da matéria orgânica no solo (MOS) nos primeiros 0,1 m de profundidade, que potencialmente diminui a perda de K proporcionada pelas cargas negativas da MOS.

A opção pelo sistema de adubação antecipada é justificada pela vantagem operacional, a qual reduz o custo da semeadura, pois o nutriente é aplicado a lanço,

em época que as máquinas não são utilizadas (MATOS; SALVI; MILAN, 2006). Outra vantagem explorada é a possibilidade de instalar a cultura no período definido pelo zoneamento agrícola, pois a semeadura é feita em menos tempo, porque não há necessidade de abastecer com fertilizante. A maior quantidade de K presente no resíduo da cultura de entressafra retorna ao solo entre 10 e 20 dias (CRUSCIOL et al., 2008), em razão da forma livre que se encontra na planta (K^+).

Em tese o sistema de adubação antecipada não prejudica a nutrição do milho por falta de K. Algumas pesquisas comprovaram que o fornecimento do K na entressafra não afetou a produtividade ou a produção de matéria seca de milho (PAVINATO; CERETTA, 2004), soja (FOLONI; ROSOLEM, 2008) e arroz (SIMONETE et al., 2002).

A eficiência de uso do K proveniente do fertilizante pode ser estimada pelo método da recuperação aparente. A eficiência é obtida pela razão entre a diferença de K presente na planta fertilizada (K-solo + K-fertilizante) e na planta não fertilizada (K-solo) e a quantidade de K aplicada no solo (K-fertilizante). Na presente pesquisa, optou-se pelo uso do rubídio (^{85}Rb) para marcar o fertilizante, a fim de avaliar a eficiência em vários sistemas de adubação potássica. O rubídio (^{85}Rb) pode ser usado porque é um elemento análogo ao K, com pequena discriminação entre ambos (KOCHIAN; LUCAS, 1982; LÄUCHLI; EPSTEIN, 1970; POLLEY; HOPKINS, 1979).

A adubação antecipada é considerada adequada porque não varia a produtividade comparativamente à que se faz no milho. No entanto, esse critério não serve para afirmar se o sistema de adubação permite ou não uso eficiente do K fornecido pelo fertilizante.

Esta pesquisa foi realizada com o objetivo de avaliar a eficiência de uso do K em razão do sistema de adubação potássica do milho. A Figura 1 apresenta de forma esquemática o problema a que se refere a presente pesquisa.

Figura 1 – Apresentação esquemática do problema que motivou a realização da presente pesquisa

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A dose recomendada de potássio para a cultura do milho varia com a produtividade e o teor trocável no solo. No Estado de São Paulo recomenda-se entre 90 kg ha⁻¹ e 160 kg ha⁻¹ de K₂O para produtividade entre 10 e 12 Mg ha⁻¹ (RAIJ et al., 1997). No Estado de Minas Gerais a recomendação também considera o teor trocável, e varia entre 60 e 90 kg ha⁻¹ para produtividade superior a 8 Mg ha⁻¹ (ALVES et al., 1999). Na região do Cerrado, em solo com teor de K entre 31 e 40 mg kg⁻¹ e CTC inferior a 40 mmol_c dm⁻³ ou teor entre 51 e 80 mg kg⁻¹ de K e CTC superior a 40 mmol_c dm⁻³, recomenda-se aplicar 6 kg de K₂O para cada 1000 kg de grãos, equivalente a exportação do nutriente (VILELA; SOUSA; SILVA, 2004). Na região sul do Brasil, a dose varia entre 30 e 70 kg ha⁻¹ de K₂O para produtividade de até 4 Mg ha⁻¹ de grãos, e acima desta produtividade recomenda-se acrescentar mais 10 kg ha⁻¹ de K₂O para cada 1000 kg de grãos adicional (COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO - CQFS-RS/SC, 2004).

O íon K não faz parte de estruturas orgânicas nas células vegetais (MARSCHNER, 1995). Do K total contido nos resíduos vegetais, cerca de 70% é solúvel em água, e retorna ao solo, com máxima liberação, entre 20 e 60 dias (GIACOMINI et al., 2003). Assim, com o propósito de evitar a perda do nutriente por lixiviação, recomenda-se não atrasar a instalação da cultura seguinte (GIACOMINI et al., 2003).

A máxima absorção de K pelo milho acontece entre 30 e 40 dias após a emergência. Durante os primeiros 65 dias a 75 dias a planta acumula 50% da biomassa seca, e 90% da demanda de K pelo milho (COELHO, 2005). A quantidade de K extraída pela cultura varia com a produtividade e pode superar 160 kg ha⁻¹, dos quais entre 20 e 30% encontram-se nos grãos (COELHO, 2005).

Nos solos brasileiros o K existe, basicamente, em três compartimentos: K solução, K trocável e K não-trocável. As raízes absorvem o K da solução do solo, cujo equilíbrio se mantém pelo K trocável, em que o nutriente está adsorvido nos minerais de argila e na matéria orgânica. O K não-trocável refere-se à quantidade do nutriente presente nas entre camadas dos argilominerais. O K trocável representa o compartimento de reserva mais importante para o fornecimento do nutriente às plantas, pois é prontamente disponível (MOODY; BELL, 2006; RAIJ, 1991).

O suprimento de K para as plantas depende fundamentalmente da fertilização potássica e da ciclagem do nutriente, pois o fornecimento por meio do intemperismo de minerais primários e secundários é insignificante, nos solos em clima tropical úmido (ROSOLEM; VICENTINI; STEINER, 2012). Portanto, a remoção de K por colheitas sucessivas esgotam o nutriente da solução e da reserva trocável (PAL; GILKES; WONG, 2001).

O sistema de adubação antecipada é uma prática adotada a fim de aproveitar a época em que as máquinas e implementos estão disponíveis na propriedade. Neste sistema, os nutrientes, inclusive o potássio, são aplicados na cultura de entressafra. Esta prática se faz no SPD, em que as plantas presentes no outono-inverno absorvem o nutriente do solo e aquele proveniente do fertilizante que seria, tradicionalmente, aplicado no milho. Posteriormente, o K é disponibilizado pela ciclagem na superfície do solo (CALEGARI et al., 2013). Neste sistema, a perda deste nutriente por lixiviação pode ser minimizada, graças ao cultivo de entressafra.

Na pesquisa realizada por Rosolem et al. (2007), os autores observaram que o K foi liberado lentamente, quando as plantas de cobertura foram dessecadas com herbicidas e mantidas “em pé”, em razão da menor superfície de contato com o solo. Assim, a liberação do K pode ser mais demorada, devido à incidência de chuvas sobre uma menor superfície de material vegetal.

O resíduo de plantas fertilizadas com potássio liberou após a dessecação, até 30 kg ha^{-1} de K no solo, quando submetida a 80 mm de chuva simulada. Cerca de 60% a 80% do K permaneceu, ainda, no resíduo, disponível ao cultivo seguinte (ROSOLEM; CALONEGO; FOLONI, 2005).

Em estudos de liberação de K dos resíduos de aveia-preta, Giacomini et al. (2003) determinaram que a taxa média de liberação de K foi 4,5 vezes superior ao do fósforo, e, praticamente, todo o K contido nos resíduos foi liberado nos primeiros 60 dias. No trabalho de Crusciol et al. (2008), o manejo da aveia-preta com rolo faca, seguida da aplicação de glyphosate no perfilhamento, houve liberação de 98% do K em 53 dias. Os autores mencionam, ainda, que até 13 dias após o manejo da aveia houve uma liberação de 35 kg ha^{-1} de K_2O . Para Rosolem et al. (2007) a saída do K da palha da aveia ocorre sem dificuldade, pois uma chuva de 10 mm retirou até 3% do K total presente no tecido vegetal. Para Rossato (2004), aveia que produz 4.355 kg ha^{-1} de matéria seca (MS) pode fornecer, via ciclagem de nutrientes, até 100 kg ha^{-1} de K ao milho semeado na sequência.

No estudo sobre adubação potássica no azevém para suprir K ao arroz irrigado, Simonete et al. (2002) encontraram 56% do K aplicado na massa seca da cultura de inverno, sem alterar a produtividade do arroz, comparada à aplicação feita diretamente no arroz. A adubação antecipada de K foi estudada por Pavinato e Ceretta (2004) na sucessão trigo/milho na região sul, em solo com alto potencial produtivo. Nesta pesquisa os autores não verificaram diferença na produtividade do milho, independentemente da dose e do método de adubação dos nutrientes (P e K). Estes autores também afirmaram que aumentou a eficiência operacional da semeadura, com custo menor na compra do fertilizante, pela aquisição fora da época de maior demanda. Em área de SPD, Foloni e Rosolem (2008) avaliaram a adubação antecipada na sucessão milheto/soja, e verificaram que o fornecimento de 80 e 90 kg ha⁻¹ de K₂O na cultura antecessora mantiveram a produtividade da soja, mesmo quando esta não foi adubada com K.

A eficiência de uso do K proveniente do fertilizante pode ser estimada pelo método da recuperação aparente (BALIGAR; FAGERIA; HE, 2001). A estimativa é obtida pela razão entre a diferença de K presente na planta fertilizada (K-solo + K-fertilizante) e na planta não fertilizada (K-solo) e a quantidade de K aplicada no solo (K-fertilizante). A eficiência de uso do K proveniente do fertilizante é influenciada pelo teor disponível do nutriente no solo. Baligar e Bennett (1986ab) e Baligar; Fageria e He (2001) revisaram a literatura e reportaram que a eficiência da fertilização potássica variou entre 20% e 40%, em diversos solos da região tropical, como nos Latossolos do Brasil central.

Na cultura da canola em solos deficientes, a recuperação de potássio pelas plantas foi acima de 50%; enquanto solos com teores entre suficiente e alto, a eficiência foi próximo de 10% (ZOU et al., 2011). Na revisão sobre esse assunto, Jin (2012) encontrou 31,9% de recuperação de K pelo milho, 25,4% pelo arroz, e 26,2% pelo trigo. Estes resultados foram obtidos em primeiro cultivo. A eficiência de uso do K (EUKPf) pela cultura do trigo foi, em média, 28,7% e no milho 34,4% (ZHANG et al., 2011). A quantidade média de K nos grãos de milho foi 18,7 kg ha⁻¹ e não variou com a aplicação do nutriente ou na sua ausência. Ainda, na cultura do trigo, Liu et al. (2011) determinaram 27% de recuperação aparente de K nas três regiões produtoras da China, durante oito anos de estudos.

Nas pesquisas sobre a antecipação do K não se constatou prejuízo na produção de matéria seca de plantas e na produtividade do arroz (SIMONETE et al.,

2002), do milho (PAVINATO; CERETTA, 2004), e da soja (FOLONI; ROSOLEM, 2008). A demanda da cultura principal pode ser atendida, em parte, pela cultura de entressafra. No entanto, não se sabe a eficiência de uso do K do fertilizante, em razão dos sistemas de adubação.

Do K aplicado na cultura, parte é absorvida pela planta e, a outra parte permanece no solo. Daquela que fica no solo, uma fração lixivia à profundidade que pode ultrapassar a zona efetiva das raízes. Assim, há necessidade de obter mais informações sobre a eficiência da fertilização potássica, em particular em relação à época de fornecimento do nutriente, variável com o sistema de adubação.

A eficiência de uso do nutriente proveniente do fertilizante pode ser obtida por meio de traçadores isotópicos como no caso do ^{15}N (HARDARSON, 1990). Em relação ao K já foi usado, há algum tempo, o isótopo estável do rubídio (^{85}Rb) como marcador. O ^{85}Rb pode ser usado para marcar o solo (CALVACHE et al., 1991), a planta (LIMA FILHO; MALAVOLTA, 2003), e o fertilizante (CALVACHE; PINO; BUNEDER, 1990).

Em pesquisa que avaliou 22 espécies, entre elas o milho e a aveia, o Rubídio (Rb) foi absorvido e mobilizado tão prontamente quanto o K (COLLANDER, 1941), uma evidência da não distinção destes íons monovalentes (BUXBAUM; NOWAK; WHITE, 2001). O raio iônico hidratado do K e do Rb são semelhantes e ocupam o mesmo sítio de absorção na membrana plasmática das raízes. No entanto, as funções metabólicas do K não podem ser substituídas totalmente pelo Rb (BALIGAR; BARBER, 1978; BALIGAR; NIELSEN; BARBER, 1979; ERDEI; TRIVEDI, 1991; MARSCHNER, 1995). O Rb comporta-se de maneira semelhante ao K, com pequena discriminação entre ambos (KOCHIAN; LUCAS, 1982; LÄUCHLI; EPSTEIN, 1970; POLLEY; HOPKINS, 1979). O Rb é absorvido pelos mesmos mecanismos do potássio e, aproximadamente, na mesma proporção (MENZEL; HEALD, 1955). Pode-se determiná-lo e quantificá-lo facilmente, pois não é um constituinte comum, tanto na planta quanto no solo (MAYNARD; BAKER, 1965).

A disponibilidade de K pode ser determinada por isótopos radioativos, tanto de potássio quanto de rubídio, por exemplo, o ^{42}K e o ^{86}Rb . No entanto, a análise destas formas é complexa, pela pequena atividade específica e meia-vida reduzida, motivos pelos quais não são usados em experimentos biológicos de médio e longo prazo (VOSE, 1980). O ^{85}Rb não apresenta limitação quanto a meia vida, pois é estável e pode ser usado em experimentos de longo prazo.

Na pesquisa sobre remobilização do K realizada por Lima Filho e Malavolta (2003), os autores obtiveram correlação altamente significativa entre K e ^{85}Rb em mudas de café. No estudo com raízes de milho ficou comprovado, por meio da cinética de absorção, que a planta absorve tanto K quanto ^{86}Rb , pelos mesmos mecanismos (BALIGAR; NIELSEN; BARBER, 1979).

3 MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa foi realizada em Guarapuava/PR a 25°31' de latitude sul, 51°40' de longitude oeste e 1.095 m de altitude, e em Taquarituba/SP a 23°35' de latitude sul, 49°14,9' de longitude oeste e 646 m de altitude.

A área experimental em Guarapuava agricultada há 30 anos em SPD, e na última safra, antes da instalação do experimento, foi cultivada soja na primavera-verão e cevada no outono-inverno. Em Taquarituba, a área era ocupada há 40 anos com pastagem, e somente nos últimos três anos cultivou-se soja/milho em rotação no SPD.

O clima na região de Guarapuava é classificado como subtropical úmido, com verão ameno (Cfb, segundo Köppen), e precipitação de 2.100 mm, e temperatura média inferior a 22 °C. O clima de Taquarituba é classificado como subtropical úmido, com verão quente (Cfa, segundo Köppen), precipitação de 1.600 mm, e temperatura média superior a 22 °C no verão. O climograma das áreas experimentais está apresentado na figura 2.

O solo do experimento de Guarapuava é classificado como Latossolo Bruno Distrófico típico (EMBRAPA, 2006), em cuja composição granulométrica do horizonte A tem-se: 100 g kg⁻¹ de areia, 228 g kg⁻¹ de silte e 672 g kg⁻¹ de argila. O solo da área de Taquarituba é classificado como Nitossolo Vermelho Eutrófico típico (EMBRAPA, 2006), cuja composição granulométrica apresenta 200 g kg⁻¹ de areia, 270 g kg⁻¹ de silte e 530 g kg⁻¹ de argila no horizonte A.

Figura 2 – Precipitação pluvial média mensal e temperatura média mensal durante a condução dos experimentos entre abril de 2012 e abril de 2013, em Guarapuava/PR e Taquarituba/SP. As letras G (Guarapuava, barra preta) e T (Taquarituba, barra branca); e a letra T seguida de número corresponde ao tratamento (sistema de adubação)

No experimento de Guarapuava, a aveia branca (*Avena sativa*) foi semeada a lanço em abril de 2012, em que a população de 111,5 plantas m^{-2} produziu 3.060 $kg\ ha^{-1}$ de massa seca, avaliada em agosto de 2012. Em setembro de 2012, trinta dias após a dessecação da aveia, semeou o milho híbrido P1630H com espaçamento de 0,7 m entrelinhas, cuja população foi de 73.500 plantas por hectare.

No experimento de Taquarituba, a aveia preta (*Avena strigosa*) foi semeada em linhas, em maio de 2012, em que a população de 65 plantas m^{-2} produziu 2.133 $kg\ ha^{-1}$ de massa seca. Em novembro de 2012, 15 dias após a dessecação da aveia, semeou o milho híbrido DKB390H a 0,45 m entrelinhas, cuja população foi de 66.200 plantas por hectare.

Os resultados da análise química do solo das áreas experimentais estão apresentados na tabela 1. Os solos possuem alta fertilidade, como indicam o teor de

matéria orgânica, os teores de nutrientes catiônicos e a saturação por bases. As duas áreas experimentais apresentaram teores altos a muito altos de K trocável, condição necessária à adoção do sistema de adubação antecipada do K, tendo como referência o teor adequado entre 1,6 e 3 mmol_c dm⁻³ (RAIJ et al., 1997).

Tabela 1 - Resultados das análises químicas do solo das duas áreas experimentais, antes da instalação dos experimentos em 2012

Local	pH	MO g dm ⁻³	P mg dm ⁻³	K	Ca	Mg	H+Al mmol _c dm ⁻³	Al	SB	CTC	V %
G	5,1	51	29	4,0	50	23	64	0	77	141	55
T	5,5	40	19	7,6	42	31	34	0	81	115	70

G: Guarapuava/PR; T: Taquarituba/SP. Métodos: pH em CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹ (acidez ativa); MO (matéria orgânica) – Dicromato/Colorimétrico; P, K, Ca e Mg – extração pela Resina trocadora de íons; H+Al (acidez potencial) – pH SMP; Alumínio trocável – titulometria (1 mol L⁻¹)

Os sistemas de adubação potássica, para fins de avaliação da eficiência de uso do nutriente proveniente do fertilizante, foram: K aplicado no perfilhamento da aveia; K aplicado em pré-semeadura do milho; K aplicado na semeadura do milho; K aplicado em cobertura no estágio V3 do milho; e K aplicado nos estádios V3 (50%) e V6 (50%) do milho. As datas da aplicação do K estão descritas na tabela 2. O potássio foi aplicado a lanço nos dois locais, de acordo com o sistema de adubação (Tabela 2).

Tabela 2 – Sistema de adubação de K em Taquarituba/SP e em Guarapuava/PR, em 2012

Tratamentos	Guarapuava	Taquarituba
K no perfilhamento aveia	18/05	20/05
K na pré-semeadura do milho	25/08	30/10
K na semeadura do milho	22/09	14/11
K em cobertura no estágio V3 do milho	16/10	04/12
K em cobertura nos estádios V3 e V6	16/10 e 01/11	04 e 15/12

Em Guarapuava, as quantidades dos nutrientes aplicadas foram iguais a 265 kg ha⁻¹ de N, 180 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 128 kg ha⁻¹ de K₂O. No sulco de semeadura aplicou-se 32 kg ha⁻¹ de N e a dose total de P. Os 233 kg ha⁻¹ de N restantes aplicou-se a lanço, no estágio V3 (três folhas expandidas). Em Taquarituba, aplicaram-se as seguintes doses: 195 kg ha⁻¹ de N, 86 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 80 kg ha⁻¹

de K_2O . O nitrogênio (180 kg ha^{-1}) foi aplicado por meio da semeadora, em pré-semeadura incorporado em sulco de 0,15 m de profundidade.

A semeadura do milho foi realizada a 0,22 m do sulco da fertilização nitrogenada, com aplicação de mais 15 kg ha^{-1} de N e a dose total de P. As parcelas experimentais tinham sete linhas de dez metros, com área de 56 m^2 no experimento de Guarapuava e 36 m^2 em Taquaritiba, em razão do menor espaçamento. A variação da área experimental deve-se aos espaçamentos utilizados em cada local, o mesmo aconteceu com a área destinada a aplicação do fertilizante marcado com ^{85}Rb nas microparcelsas, no centro das parcelas (Figura 3).

Na presente pesquisa usou-se ^{85}Rb associado ao fertilizante potássico, com o propósito de determinar a eficiência de uso do K proveniente do fertilizante, em razão dos sistemas de adubação. Para avaliar a eficiência de uso do K proveniente do fertilizante foi substituído 10% da dose de K por ^{85}Rb aplicado a lanço nas microparcelsas (Figura 3), na forma de cloreto de rubídio, junto com o fornecimento de K, na forma de cloreto de potássio.

A colheita do milho em Guarapuava ocorreu em março, e em abril de 2013 em Taquaritiba. A produtividade do milho foi determinada a partir da colheita das espigas em três linhas de 5 m, e correção da massa de grãos para 130 g de água por kg de grãos. No interior da microparcelsa colheu a parte aérea das plantas de milho presentes na linha central. Ainda, coletou-se a parte aérea das presentes nas linhas adjacentes à linha central. As plantas coletadas foram analisadas separadamente.

Figura 3 – Esquema das parcelas e microparcelsas utilizadas nos experimentos realizados em Guarapuava/PR e Taquaritiba/SP

As plantas da linha central e das linhas adjacentes foram separadas em grãos e parte aérea (colmo, folha, inflorescência, brácteas, sabugo). As respectivas partes do milho (grãos e parte aérea) foram colocadas em estufa com circulação de ar a 65 °C por 72 horas. Após a determinação da massa seca, as partes foram moídas em moinho tipo Willey, com peneira de malha de 1,0 mm. O teor de K nas partes das plantas de milho foi determinado por fluorescência de raios X (EDX-720, Shimadzu), assim como a abundância do ^{85}Rb nos respectivos tecidos. As amostras foram irradiadas por raios X de ródio, nas seguintes condições operacionais selecionadas: colimador - 10 mm, atmosfera - ar, tensão no tubo de 15 kV (para K) e 50 kV (para Rb), corrente no tubo - 1 mA, tempo de irradiação - 100 s (TEZOTTO, 2013).

As curvas de calibração foram construídas por meio da adição de quantidades conhecidas de K e Rb em amostras de milho coletadas da área adjacente ao experimento. As amostras de plantas cultivadas com fertilizante não marcado, após secagem e moagem, receberam doses da solução com concentrações de 0 a 50 g kg^{-1} para o K e 0 a 50 mg kg^{-1} para o Rb. As leituras destas amostras permitiram o ajuste de uma equação entre intensidade de emissão e concentração do elemento no tecido vegetal. A quantificação do teor natural do material foi realizada pela diferença entre as amostras sem enriquecimento com solução de Rb e K (amostras de abundância natural) e as que não receberam fertilizante marcado no campo. O K total foi obtido pela equação 1:

$$K_T = \frac{(K_P \times M_S)}{100} \quad (1)$$

em que: **K_T** corresponde à quantidade total de K de cada parte da planta proveniente do solo e do fertilizante (kg ha^{-1}), **K_P** representa o teor de K nas respectivas partes da planta (%), e **M_S** a massa de matéria seca de cada parte da planta (kg ha^{-1}).

A eficiência de uso do K proveniente do fertilizante (EUKPf) pelo milho foi calculada pelas equações 2 e 3.

$$KMP_f = \left[\frac{(A - C)}{(B - C)} \right] \times K_T \quad (2)$$

$$EUKPf = \left(\frac{KMPf}{KAf} \right) \times 100 \quad (3)$$

em que: **KMPf** corresponde ao K no milho proveniente do fertilizante (% na equação 2, e em kg ha⁻¹ na equação 3), **A** representa a abundância de ⁸⁵Rb na planta, **B** é a abundância de ⁸⁵Rb no fertilizante, e **C** a abundância natural de ⁸⁵Rb na planta; **KT** corresponde a quantidade total de K na planta, determinada pela equação 1 (kg ha⁻¹), **EUKPf** a eficiência de uso do K proveniente do fertilizante (%); e **KAf** corresponde a dose de K aplicada via fertilizante (101,1 kg ha⁻¹ em Guarapuava e 62,9 kg ha⁻¹ em Taquarituba).

Os dados foram submetidos à análise da variância pelo teste F e em seguida ao teste de comparação de médias a 5% de probabilidade. Quando a variável resposta apresentou significância entre tratamentos (sistemas de adubação) realizou-se a análise de variância conjunta, para verificar a interação local (L) x tratamentos (T). As análises foram realizadas com auxílio do programa Statistical Analysis System versão Windows 9.2 (SAS, 2008).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A produtividade do milho e a matéria seca da parte aérea (MSPA, sem os grãos) não diferiram em razão do sistema de adubação potássica, nos dois experimentos (Tabelas 3 e 4). A probabilidade de resposta em produtividade, de acordo com o sistema de adubação, era pequena, uma vez que o teor de K no solo era alto em Guarapuava e muito alto em Taquarituba, premissa para o uso da adubação antecipada.

Tabela 3 - Produtividade do milho (kg ha^{-1}) nos dois experimentos, em razão do sistema de adubação potássica

Tratamentos	Guarapuava	Taquarituba
	Produtividade - kg ha^{-1}	
K no perfilhamento da aveia	15.176	8.706
K na pré-semeadura do milho	15.338	11.343
K na semeadura do milho	16.015	10.072
K em cobertura no estágio V3 milho	15.815	9.568
K em cobertura nos estádios V3 e V6	16.909	9.734
Média	15.851	9.885
Pr>F ¹	0,3017 ^{ns}	0,5653 ^{ns}
CV (%) ²	7,36	22,28

¹ Valor do teste F da análise da variância; ² coeficiente de variação; ^{ns} não significativo

A diferença de produtividade e de MSPA entre os locais ocorreu devido ao maior potencial de produção de milho da região de Guarapuava, em relação à Taquarituba. A produção média de grãos em Guarapuava foi $15.851 \text{ kg ha}^{-1}$, enquanto em Taquarituba foi de 9.885 kg ha^{-1} (Tabela 3). A produção média de MSPA em Guarapuava foi $14.331,7 \text{ kg ha}^{-1}$, enquanto em Taquarituba foi de $11.918,6 \text{ kg ha}^{-1}$ (Tabela 4). A perda de fotoassimilados pela respiração noturna é menor em Guarapuava, localizada a 1.095 m de altitude. É de conhecimento a relação entre temperatura e respiração, a qual aumenta em locais mais quentes, como acontece em Taquarituba, localizada a 646 m de altitude. A diferença de biomassa da parte aérea ($2.413,1 \text{ kg ha}^{-1}$) equivale à incorporação de mais $1.013,5 \text{ kg ha}^{-1}$ de carbono (C) no milharal de Guarapuava, assumindo 42% de C na composição da biomassa, assimilado da atmosfera, como CO_2 . Esta observação confirma o maior saldo de carboidrato, direcionada à produção de grãos em Guarapuava.

Tabela 4 - Matéria seca da parte aérea (MSPA, kg ha⁻¹) do milho nos dois experimentos, em razão do sistema de adubação

Tratamentos	Guarapuava	Taquarituba
	MSPA – kg ha ⁻¹	
K no perfilhamento da aveia	13.906,7	11.673,1
K na pré-semeadura do milho	14.627,1	13.041,8
K na semeadura do milho	14.527,1	12.835,2
K em cobertura no estágio V3 milho	14.058,4	10.845,6
K em cobertura nos estádios V3 e V6	14.539,1	11.197,5
Média	14.331,7	11.918,6
Pr>F ¹	0,9042 ^{ns}	0,1276 ^{ns}
CV (%) ²	9,09	11,01

¹ Valor do teste F da análise da variância; ² coeficiente de variação; ^{ns} não significativo

A quantidade de MSPA e produtividade de milho obtida por Pavinato e Ceretta (2004) foram iguais a 10.471 kg ha⁻¹ e 8.852 kg ha⁻¹ nessa ordem, na rotação milho/trigo. Para os autores a produtividade do milho e a biomassa seca também não variaram com a época de aplicação do K, em solos com alto teor do nutriente, como da presente pesquisa (Tabela 3 e 4).

As quantidades de potássio na planta (KT: parte aérea + grãos), nos grãos (KG) e na parte aérea (KPA) também não variaram com o sistema de adubação potássica, independentemente do local (Tabelas 5 e 6). A ausência de resposta destas variáveis pode ser explicada pela quantidade de K trocável, suficiente para atender a demanda do milho, as quais foram iguais a 170,7 kg ha⁻¹ de K em Guarapuava e 147 kg ha⁻¹ em Taquarituba, e a oferta do solo eram da ordem de 312 kg ha⁻¹ e 593 kg ha⁻¹ de K, nas respectivas regiões. Pavinato e Ceretta (2004) determinaram, aproximadamente, 230 kg ha⁻¹ de K total no milho em pleno florescimento. A menor quantidade de K determinada na presente pesquisa, em relação aos valores obtidos em pleno florescimento por Pavinato e Ceretta (2004), pode ser explicada pela remobilização do nutriente da parte aérea para os grãos, uma vez que a determinação foi feita na colheita; assim como pela retirada do nutriente da biomassa aérea pela precipitação, como observaram em resíduos de milheto e aveia (ROSOLEM; CALONEGO; FOLONI, 2005; ROSOLEM et al., 2007).

Tabela 5 - Potássio total na planta de milho (KT: grãos + parte aérea) nos dois experimentos, em razão do sistema de adubação

Tratamentos	Guarapuava		Taquarituba	
	KT - kg ha ⁻¹	K - %	KT - kg ha ⁻¹	K - %
K no perfilhamento da aveia	156,0	1,12	134,6	1,20
K na pré-semeadura do milho	165,0	1,13	158,0	1,22
K na semeadura do milho	173,6	1,19	163,1	1,30
K cobertura no estágio V3 milho	174,1	1,24	137,1	1,27
K cobertura nos estádios V3 e V6	184,8	1,27	141,9	1,27
Média	170,7	1,19	147,0	1,25
Pr>F ¹	0,4295 ^{ns}	-	0,1264 ^{ns}	-
CV (%) ²	12,47	-	11,70	-

¹ Valor do teste F da análise da variância; ² coeficiente de variação; ^{ns} não significativo

A quantidade média de potássio nos grãos foi 18,9 kg ha⁻¹ em Guarapuava e 25,4 kg ha⁻¹ em Taquarituba (Tabela 6), valor semelhante ao determinado por Zhang et al. (2011), que obtiveram 18,6 kg ha⁻¹ de K, média de 18 anos em cinco regiões. A demanda de K por tonelada de grãos foi 1,3 kg e 2,2 kg, nos experimentos em Guarapuava e em Taquarituba, nessa ordem. Os valores determinados na presente pesquisa são inferiores aos descritos na literatura, como 8 kg t⁻¹ de grãos (FERREIRA et al., 2012), 3,3 kg t⁻¹ (ZHANG et al., 2011), 8,3 kg t⁻¹ (CQFS-RS/SC, 2004) e 5 kg t⁻¹ de grãos (RAIJ et al., 1997).

Tabela 6 - Quantidade de potássio nos grãos (KG: kg ha⁻¹ e em %) e na parte aérea (KPA: kg ha⁻¹ e em %) nos dois experimentos, em razão do sistema de adubação potássica

Tratamentos	Guarapuava				Taquarituba			
	KG		KPA		KG		KPA	
	kg ha ⁻¹	%	kg ha ⁻¹	%	kg ha ⁻¹	%	kg ha ⁻¹	%
K no perf. da aveia	20,7	0,15	135,4	1,0	22,5	0,23	112,0	1,0
K pré-semeadura milho	18,7	0,13	146,3	1,0	29,6	0,23	128,4	1,0
K semeadura do milho	15,9	0,11	157,7	1,1	27,5	0,23	135,7	1,1
K cobertura estágio V3	20,2	0,14	154,0	1,1	23,7	0,21	113,4	1,1
K cobertura em V3/V6	19,2	0,13	165,6	1,1	23,7	0,21	118,2	1,1
Média	18,9	0,13	151,8	1,1	25,4	0,22	121,6	1,1
Pr>F ¹	0,59 ^{ns}	-	0,23 ^{ns}	-	0,26 ^{ns}	-	0,13 ^{ns}	-
CV (%) ²	23,04	-	11,9	-	19,03	-	11,27	-

¹ Valor do teste F da análise da variância; ² coeficiente de variação; ^{ns} não significativo

A exportação de K pelos grãos (KG) foi 11% do K total (KT) extraído pelo milho no experimento em Guarapuava e 17,2% do KT em Taquarituba (Tabelas 5 e

6). O resultado em Taquarituba foi semelhante aos 17,5% obtido por Zhang et al. (2011), mas inferior ao determinado por Coelho (2005), entre 20% e 30%. Na presente pesquisa, a baixa quantidade de K determinado no milho deve-se, provavelmente, a retirada do nutriente das plantas senescentes pela chuva. Os baixos valores referentes à exportação devem-se, provavelmente, à diferença entre os materiais genéticos das pesquisas.

A quantidade de K no milho proveniente do fertilizante (KMPf) e a eficiência de uso do nutriente do fertilizante (EUKPf) variaram com o sistema de adubação potássica (Tabela 7). A fertilização realizada em pré-semeadura do milho apresentou os maiores valores para KMPf e EUKPf nos dois experimentos, seguida do sistema em que o K foi antecipado no perfilhamento da aveia e na semeadura do milho. Os valores de KMPf e EUKPf na pré-semeadura foram iguais a $14,8 \text{ kg ha}^{-1}$ (14,6%) e $12,0 \text{ kg ha}^{-1}$ (19%) em Guarapuava e Taquarituba, respectivamente. Na adubação antecipada no perfilhamento da aveia determinou-se $10,4 \text{ kg ha}^{-1}$ (10,3%) em Guarapuava e $8,7 \text{ kg ha}^{-1}$ (13,8%) em Taquarituba, sem diferir da aplicação feita na semeadura do milho, em que obteve $10,9 \text{ kg ha}^{-1}$ (10,8%) em Guarapuava e $9,5 \text{ kg ha}^{-1}$ (15,1%) em Taquarituba (Tabela 7).

A adubação do milho antecipada na pré-semeadura, no perfilhamento da aveia e na semeadura da planta beneficiou a recuperação (KMPf) e a eficiência de uso do K do fertilizante (EUKPf), porque o nutriente estava presente no solo, na época de máxima absorção pelo milho, como acontece nos primeiros 30 dias após a emergência (COELHO, 2005). Na aplicação ainda mais antecipada, como no perfilhamento da aveia, houve prejuízo da recuperação e da eficiência de uso, talvez porque, a antecedência da aplicação do K tenha facilitado a lixiviação do nutriente abaixo da zona efetiva de raízes. E, ainda, o K contido no resíduo da aveia recicla sem dificuldade (GIACOMINI et al., 2003; ROSOLEM et al., 2007), pois as chuvas retiram parte do nutriente da biomassa (Figura 2).

Os menores valores de KMPf e EUKPf foram determinados nos sistemas de adubação em que o K foi aplicado diretamente no milho, como no estágio V3, e nos estádios V3 e V6. Nestes sistemas de adubação perde-se parte do período de máxima absorção do nutriente pelo milho, pois de acordo com Ciampitti et al. (2013) a planta em V5 acumulou entre 80% e 90% do K total. Nestes sistemas de adubação o aproveitamento do K proveniente do fertilizante foi menor, o que implica na sua presença no solo. Nesta condição ficará sujeito a perda por lixiviação, em razão da

continuidade da precipitação em ambiente de clima subtropical, mesmo depois da colheita do milho. Portanto, com o propósito de evitar esta perda, recomenda-se a implantação o mais breve possível da cultura de entressafra (GIACOMINI et al., 2003), e que o fornecimento do K seja na pré-semeadura do milho. Nos solos de textura argilosa, alta capacidade de troca de cátions e alto teor de MOS, como da presente pesquisa (Tabela 1), o potencial de perda por lixiviação é menor.

Pela metodologia utilizada na presente pesquisa, que substituiu 10% da dose de K por ^{85}Rb , a eficiência de uso do K proveniente do fertilizante apresentou valores entre 5,8% e 14,6% em Guarapuava, e entre 12,2% e 19% em Taquarituba (Tabela 7). Estes valores são baixos, quando comparado aos 25% e 38% no arroz (FAGERIA; SANTOS; MORAES, 2010); 28,7% em trigo, e 34,4% em milho (ZHANG et al., 2011), obtidos pelo método da recuperação aparente. Em razão da baixa recuperação, conclui-se que, a maior parte do potássio do milho foi suprida pelo solo (Figura 4), uma vez que o teor de K trocável era alto e muito alto em Guarapuava e Taquarituba, respectivamente (Tabela 1). A contribuição do solo para o milho foi ainda maior, quando se aplicou o K diretamente na cultura (Tabela 7 e Figura 4). A eficiência de uso do K do fertilizante depende do teor no solo, a qual foi maior que 50% na canola cultivada em solo deficiente, enquanto para teor entre suficiente e alto, a eficiência foi próxima de 10% (ZOU et al., 2011).

Tabela 7 – Recuperação do K proveniente do fertilizante pelo milho (KMPf: kg ha^{-1}) e eficiência de uso do potássio do fertilizante (EUKPf: %) nos dois experimentos, em razão do sistema de adubação potássica

Tratamentos	Guarapuava	Taquarituba	Guarapuava	Taquarituba
	KMPf - kg ha^{-1}		EUKPf - %	
K no perf. da aveia	10,4B	8,7B	10,3B	13,8B
K pré-semeadura milho	14,8A	12,0A	14,6A	19,0A
K semeadura do milho	10,9B	9,5B	10,8B	15,1B
K cobertura estágio V3	8,2BC	7,7C	8,2BC	12,2C
K cobertura em V3/V6	5,8C	7,7C	5,8C	12,2C
Média	10,03	9,10	9,92b	14,47a
	Pr>F ¹		Pr>F ¹	
Local	0,2468 ^{ns}		0,0002**	
Tratamentos	0,0002**		0,0007**	
Local x Tratamentos	0,4193		0,5699	
CV (%) ²	25,76		6,86	

Médias seguidas de letras minúsculas significam diferenças entre os locais; ¹ Valor do teste F da análise da variância; ² coeficiente de variação; ^{ns} não significativo. ** significativo a 1%

A figura 4 evidencia a contribuição relativa de K pelo solo e fertilizante, em cada sistema de adubação e região onde foi realizada a pesquisa. As aplicações antecipadas apresentaram maior EUKPF nos dois locais, sem variação da produtividade de grãos, em que a maior parte do nutriente foi suprido pelo solo.

Figura 4 – Contribuição relativa de K pelo solo e fertilizante nos dois experimentos, em razão do sistema de adubação potássica, em que G (Guarapuava) e T (Taquarituba), e a letra T seguida de número corresponde ao sistema de adubação

Os produtores não percebem diferenças na produtividade do milho, independentemente do sistema de adubação, como também ficou comprovada na presente pesquisa (Tabela 3). No entanto, há variação na EUKPF entre os sistemas de adubação (Tabela 7), que pode ser usado para reduzir na mesma proporção a dose de K, pela aplicação na época em que a eficiência foi superior. Assim, reduz o custo e racionaliza o uso do fertilizante potássico, como quando se adota o sistema

5 CONCLUSÃO

O sistema de adubação potássica, em que o nutriente é aplicado em pré-semeadura do milho, entre 15 e 30 dias, é mais eficiente, sem prejuízo à produtividade.

REFERÊNCIAS

- ALVES, V.M.C.; VASCONCELLOS, C.A.; FREIRE, F.M.; PITTA, G.V.E.; FRANÇA, G.E.; RODRIGUES FILHO, A.; ARAÚJO, J.M.; VIEIRA, J.R.; LOUREIRO, J.E.A. Sugestões de adubação para grandes culturas anuais ou perenes: milho. In: RIBEIRO, A.C.; GUIMARÃES, P.T.G.; ALVAREZ V., V.H. (Ed.). **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. p. 314-316.
- BALIGAR, V.C.; BARBER, S.A. Use of K/Rb ratio to characterize potassium uptake by plant roots growing in soil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 42, n. 4, p. 575-579, july. 1978.
- BALIGAR, V.C.; BENNETT, O.L. Outlook on fertilizer use efficiency in the tropics. *Fertilizer Research*, The Hague, v. 10, p. 83-96. 1986a.
- BALIGAR, V.C.; BENNETT, O.L. NPK-fertilizer efficiency. A situation analysis for the tropics. *Fertilizer Research*, The Hague, v. 10, p. 147-164. 1986b.
- BALIGAR, V.C.; FAGERIA, N.K.; HE, Z.L. Nutrient use efficiency in plants. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 32, p. 921-950, 2001.
- BALIGAR, V.C.; NIELSEN, N.E.; BARBER, S.A. Kinetics of absorption of K, Rb and Cs from solution culture by intact plant roots. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 1, n. 1, p. 25-37, 1979.
- BUXBAUM, C.A.; NOWAK, C.A.; WHITE, E.H. Long-term soil nutrient dynamics and lateral nutrient movement in fertilized and unfertilized red pine plantations. **Biogeochemistry**, Dordrecht, v. 55, n. 3, p. 269-292, 2001.
- CALEGARI, A.; TIECHER, T.; HARGROVE, W.L.; RALISCH, R.; TESSIER, D.; TOURDONNET, S.; GUIMARÃES, M.F.; SANTOS, D.R. Long-term effect of different soil management systems and winter crops on soil acidity and vertical distribution of nutrients in a Brazilian Oxisol. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 133, p. 32-39, 2013.
- CALVACHE, M.; ESPINOSA, J.; CÓRDOVA, J.; GANGOTENA, D. Determinacion del potasio disponible en diferentes fuentes no marcadas (comerciales), utilizando Rb85 como trazador. **Nucleociencias**, Quito, v. 2, n. 2, p. 5-11, jun. 1991.
- CALVACHE, M.V.; PINO, I.; BUNEDER, M. Posibilidades de uso de ⁸⁵Rb como trazador de potasio. **Nucleotecnica**, Santiago, v. 10, n. 18, p. 43-45, abr. 1990.
- CIAMPITTI, I.A.; CAMBERATO, J.J.; MURRELL, S.T.; VYN, T.J. Maize nutrient accumulation and partitioning in response to plant density and nitrogen rate: I. macronutrients. **Agronomy Journal**, Madison, v. 105, n. 3, p. 783-795, may/june 2013.

COELHO, A.M. O potássio na cultura do milho. In: YAMADA, T.; ROBERTS, T.L. (Ed.). **Potássio na agricultura brasileira**. Piracicaba: Potafos, 2005. p. 613-658.

COLLANDER, R. Selective absorption of cations by higher plants. **Plant Physiology**, Minneapolis, v. 16, n. 4, p. 691-720, oct. 1941.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO. **Manual de adubação e de calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. 10. ed. Porto Alegre: SBCS, NRS, 2004. 400 p.

CRUSCIOL, C.A.C.; MORO, E.; LIMA, E.V.; ANDREOTTI, M. Taxas de decomposição e de liberação de macronutrientes da palhada de aveia preta em plantio direto. **Bragantia**, Campinas, v. 67, n. 2, p. 481-489, 2008.

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

ERDEI, L.; TRIVEDI, S. Cesium potassium selectivity in wheat and lettuce of different K^+ status. **Journal of Plant Physiology**, Stuttgart, v. 138, n. 6, p. 696-699, oct. 1991.

FAGERIA, N.K.; DOS SANTOS, A.B.; DE MORAES, M.F. Yield, potassium uptake, and use efficiency in upland rice genotypes. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 41, n. 22, p. 2676-2684, nov. 2010.

FERREIRA, C.F.; MOTTA, A.C.V.; PRIOR, S.A.; REISSMAN, C.B.; DOS SANTOS, N.Z.; GABARDO, J. Influence of corn (*Zea mays* L.) cultivar development on grain nutrient concentration. **International Journal of Agronomy**, New York, v. 10, july 2012.

FOLONI, J.S.S.; ROSOLEM, C.A. Produtividade e acúmulo de potássio na soja em função da antecipação da adubação potássica no sistema de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 4, p. 1549-1561, july/aug. 2008.

GIACOMINI, S.J.; AITA, C.; HÜBNER, A.P.; LUNKES, A.; GUIDINI, E.; AMARAL, E.B. Liberação de fósforo e potássio durante a decomposição de resíduos culturais em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, n. 9, p. 1097-1104, set. 2003.

HARDARSON, G. **Use of nuclear techniques in studies of soil-plant relationships**. 2nd ed. Vienna: IAEA, 1990. 223 p. (Training Course Series).

JIN, J. Changes in the efficiency of fertilizer use in China. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, London, v. 92, n. 5, p. 1006-1009, 2012.

KOCHIAN, L.V.; LUCAS, W.J. Potassium transport in corn roots I. Resolution of kinetics into a saturable and linear component. **Plant Physiology**, Minneapolis, v. 70, n. 6, p. 1723-1731, 1982.

LAÜCHLI, A.; EPSTEIN, E. Transport of potassium and rubidium in plant roots - significance of calcium. **Plant Physiology**, Minneapolis, v. 45, n. 5, p. 639-641, 1970.

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

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

MATOS, M.A.; SALVI, J.V.; MILAN, M. Pontualidade na operação de semeadura e a antecipação da adubação e suas influências na receita líquida da cultura da soja. **Engenharia Agrícola**, Sorocaba, v. 26, n. 2, p. 493-501, maio/ago. 2006.

MAYNARD, D.N.; BAKER, J.H. The influence of rubidium-potassium levels on growth and ion accumulation in tomato (Short communication). **Plant and Soil**, The Hague, v. 23, n. 1, p. 137-140, aug. 1965.

MOODY, P.W.; BELL, M.J. Availability of soil potassium and diagnostic soil tests. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v. 44, n. 3, p. 265-275, 2006.

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

PAL, Y.; GILKES, R.J.; WONG, M.T.F. Soil factors affecting the availability of potassium to plants for Western Australian soils: a glasshouse study. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v. 39, n. 3, p. 611-625, 2001.

PAVINATO, P.S.; CERETTA, C.A. Fósforo e potássio na sucessão trigo/milho: épocas e formas de aplicação. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 6, p. 1779-1784, 2004.

POLLEY, L.D.; HOPKINS, J.W. Rubidium (potassium) uptake by arabidopsis. **Plant Physiology**, Minneapolis, v. 64, n. 3, p. 374-378, 1979.

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

RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: Instituto Agrônômico; FUNDAG, 1997. 285 p.

ROSOLEM, C.A.; CALONEGO, J.C.; FOLONI, J.S.S. Potassium leaching from millet straw as affected by rainfall and potassium rates. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 36/1, n. 7/8, p. 1063-1074, fev. 2005.

ROSOLEM, C.A.; VICENTINI, J.; STEINER, F. Suprimento de potássio em função da adubação potássica residual em um Latossolo Vermelho do Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Brasília, v. 36, n. 5, p. 1507-1515, out./nov. 2012.

ROSOLEM, C.A.; CALONEGO, J.C.; FOLONI, J.S.S.; GARCIA, R.A. Potássio lixiviado da palha de aveia-preta e milheto após a dessecação química. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, n. 8, p. 1169-1175, ago. 2007.

ROSSATO, R.R. **Potencial de ciclagem de nitrogênio e potássio pelo nabo forrageiro intercalar ao cultivo do milho e trigo sob plantio direto**. 2004. 106 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.

SAS INSTITUTE. **The SAS System**, release 9.2. Cary, 2008.

SIMONETE, M.A.; VAHL, L.C.; FABRES, R.T.; COUTO, J.R.R.; LUNARDI, R. Efeito residual da adubação potássica do azevém sobre o arroz subsequente em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, p. 721-727, 2002.

TEZOTTO, T.; FAVARIN, J.L.; PAULA NETO, A.; 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 Agricola**, Piracicaba, v. 70, n. 4, p. 263-267, july/aug. 2013.

VILELA, L.; SOUSA, D.M.G.D.; SILVA, J.E. Adubação potássica. In: SOUSA, D.M.G.D.; LOBATO, E. (Ed.). **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2. ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. p. 169-183.

VOSE, P.B. **Introduction to nuclear techniques in agronomy and plant biology**. Oxford: Pergamon Press, 1980. 412 p.

ZHANG, H.M.; YANG, X.Y.; HE, X.H.; XU, M.G.; HUANG, S.M.; LIU, H.; WANG, B.R. Effect of long-term potassium fertilization on crop yield and potassium efficiency and balance under wheat-maize rotation in China. **Pedosphere**, Nanjing, v. 21, n. 2, p. 154-163, apr. 2011.

ZOU, J.; LU, J.W.; LI, Y.S.; LI, X.K. Regional evaluation of winter rapessed response to K fertilization, Kuse efficiency, and critical level of soil K in the Yangtze River Valley. **Agricultural Sciences in China**, Amesterdã, v. 10, n. 6, p. 911-920, june 2011.