

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
FACULDADE DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

**FORMAS E BALANÇO DE POTÁSSIO EM LATOSSOLO SOB SISTEMA
INTEGRADO DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA EM PLANTIO DIRETO NO
SUL DO BRASIL**

**Tauana Ferreira de Almeida
(Dissertação de Mestrado)**

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
FACULDADE DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

**FORMAS E BALANÇO DE POTÁSSIO EM LATOSSOLO SOB SISTEMA
INTEGRADO DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA EM PLANTIO DIRETO NO
SUL DO BRASIL**

TAUANA FERREIRA DE ALMEIDA
Engenheira Agrônoma (UFRGS)

Dissertação apresentada como
um dos requisitos à obtenção do
Grau de Mestre em Ciência do Solo

Porto Alegre (RS), Brasil

Março, 2019

CIP - Catalogação na Publicação

Ferreira de Almeida, Tauana
Formas e balanço de potássio em Latossolo sob sistema integrado de produção agropecuária em plantio direto no sul do Brasil / Tauana Ferreira de Almeida.
-- 2019.
58 f.
Orientador: Tales Tiecher.

Coorientadora: Amanda Posselt Martins.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Faculdade de Agronomia, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Porto Alegre, BR-RS, 2019.

1. Dinâmica do potássio no solo. 2. Balanço das formas de potássio no solo. I. Tiecher, Tales, orient. II. Posselt Martins, Amanda, coorient. III. Título.

TAUANA FERREIRA DE ALMEIDA
Engenheira Agrônoma - UFRGS

DISSERTAÇÃO

Submetida como parte dos requisitos
para obtenção do Grau de

MESTRE EM CIÊNCIA DO SOLO

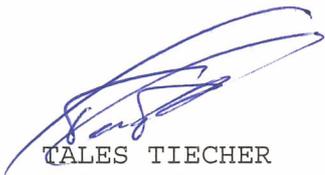
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo

Faculdade de Agronomia

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

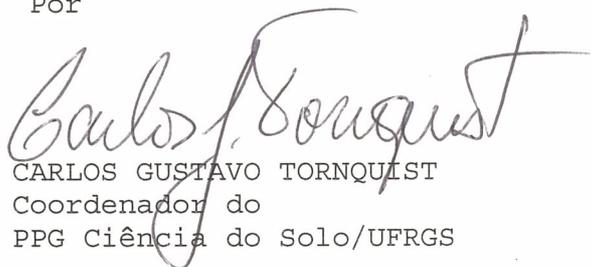
Porto Alegre (RS), Brasil

Aprovado em: 28.03.2019
Pela Banca Examinadora

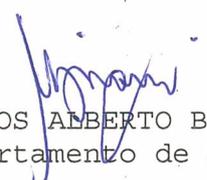


TALES TIECHER
Orientador
PPG Ciência do Solo/UFRGS

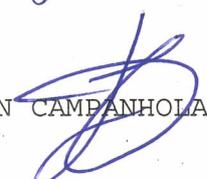
Homologado em: 19.12.2019
Por



CARLOS GUSTAVO TORNQUIST
Coordenador do
PPG Ciência do Solo/UFRGS

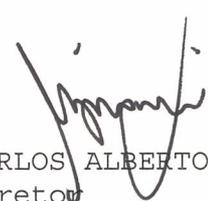


CARLOS ALBERTO BISSANI
Departamento de Solos/UFRGS



EDSON CAMPANHOLA BORTOLUZZI
UPF

GUSTAVO BRUNETTO
Departamento de Solos/UFSM
(através de videoconferência)



CARLOS ALBERTO BISSANI
Diretor
Faculdade de Agronomia
UFRGS

*Dedico este trabalho aos meus pais,
Antonio Carlos e Susan, ao meu
filho Pedro e ao Murilo.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, por diariamente renovar a minha fé e me dar forças, não só a mim, mas também aos que me acompanham diariamente nesta caminhada.

À Faculdade de Agronomia da UFRGS, pelo ensino durante a minha graduação.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da UFRGS, pela oportunidade de especialização, pelo suporte e infraestrutura.

Ao CNPq, pela bolsa de Mestrado e a FAPERGS por financiar projetos de pesquisa que permitiram desenvolver este trabalho.

Aos proprietários da Fazenda do Espinilho, por permitirem a condução do experimento em área da mesma.

Ao professor Luís César Cassol, por ter dado início ao experimento que foi objeto de estudo do presente trabalho.

Ao professor Tales Tiecher e à professora Amanda Posselt Martins, pela orientação, confiança no meu trabalho e ensinamentos passados ao longo do curso.

Aos professore(a)s Carlos Bissani, Ibanor Anghinoni, Claudia Barros e Egon Meurer, pelas conversas e ensinamentos passados.

Ao professor Edson Bortoluzzi e à Fernanda pela disponibilidade e auxílio na realização das análises de K total.

A todos os funcionários do Departamento de Solos e também da Faculdade de Agronomia, que de alguma forma tentam tornar o nosso trabalho mais leve.

Ao Adão, pelos ensinamentos passados em cada análise realizada, pela bondade e disponibilidade de estar sempre por perto auxiliando o nosso trabalho, e, principalmente, pela amizade.

Ao Dena, ao Diego e ao Jacques, por toda ajuda ao longo desses dois anos, conversas (conselhos estatísticos), parceria na realização das análises e amizade.

Aos bolsistas de iniciação científica, Dionata, Amandinha, Fernanda, Mateus, Luciano e Jeniffer, pela grande ajuda na condução das análises.

Ao Rafa, a Lu, a Gabi e novamente ao Jacques, que tornavam a salinha da química mais divertida e leve, pela amizade, conversas, risadas, e muito chimarrão.

A todos os demais integrantes do IRGEB que tive a oportunidade de conviver durante estes dois anos de Mestrado, Arnuti, Bernardo, Julia, Davi, João Pedro, Adriano, Lucas, Bruna, Victoria, Adriano, Gian, Liana e Bruno.

A todos os professores e colegas do PPG, em especial à Kelly e ao Murilo, pelo auxílio e amizade.

Ao meu irmão Teophilo, pela amizade e companheirismo durante toda a vida.

À Nuah, minha filha de quatro patas, talvez o ser que tenha passado mais tempo ao meu lado (literalmente) durante os momentos de estudo e de escrita da Dissertação, pelo seu carinho, e seu olhar de amor.

À minha mãe, Susan, o maior exemplo de bondade, por sempre me incentivar a seguir em frente, pelo seu carinho e pelo seu exemplo de determinação.

Ao meu pai, Antonio Carlos, por não medir esforços para me ver feliz. Um exemplo para mim, um dos grandes responsáveis por tudo que consegui até hoje, meu melhor amigo.

Ao meu companheiro de vida, Murilo, por todo amor, carinho, compreensão, amizade e companheirismo, por sempre ter feito o possível para tornar os meus dias mais leves e fáceis, por ter sempre um sorriso e uma boa palavra quando eu precisei.

Ao meu filho, Pedro, o maior exemplo de compreensão que Deus já colocou na minha vida. Pelo seu entendimento nos inúmeros momentos que eu não pude lhe dar a atenção merecida, e pelo seu amor puro e leve.

FORMAS E BALANÇO DE POTÁSSIO EM LATOSSOLO SOB SISTEMA INTEGRADO DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA EM PLANTIO DIRETO NO SUL DO BRASIL¹

Autor: Tauana Ferreira de Almeida

Orientador: Tales Tiecher

Co-orientadora: Amanda Posselt Martins

RESUMO

Os sistemas integrados de produção agropecuária (SIPA) afetam a dinâmica de nutrientes no solo, entre eles o potássio (K). A pesquisa em áreas de SIPA não é recente, no entanto, estudos avaliando o efeito da presença do animal em diferentes intensidades de pastejo na dinâmica e no balanço das formas de K a longo prazo nesses sistemas são escassos. O trabalho objetivou avaliar as formas de K no solo ao longo de 17 anos e o balanço deste nutriente em um SIPA em plantio direto, com diferentes intensidades de pastejo (aveia preta + azevém) de bovinos no período hibernar e produção de soja na safra de verão. O experimento foi iniciado em maio de 2001, em área pertencente à Fazenda do Espinilho, no município de São Miguel das Missões, RS, em Latossolo Vermelho Distroférico típico. Os tratamentos constam de intensidades de pastejo, sendo pastejo intensivo (PI) e pastejo moderado (PM), com 10 e 20 cm de altura de pasto, respectivamente, e um tratamento sem pastejo (SP). O delineamento experimental é o de blocos ao acaso, com três repetições. Foram coletadas amostras de solo em 2001, 2007, 2012 e 2017, nas camadas de 0-5, 5-10, 10-15 e 15-20 cm de solo. Para dessorção de K utilizou-se o extrator Mehlich-1 e os teores do nutriente foram determinados em espectrofotômetro de emissão de chama. O K total foi determinado por fluorescência de raio-X e o K não disponível foi determinado por diferença entre os teores de K total e de K potencialmente disponível, obtido pela dessorção de K. A ausência de pastejo bovino gerou aumento nos teores de K prontamente e potencialmente disponível, bem como de K não disponível e total no solo. As diferentes intensidades de pastejo avaliadas não modificaram os teores de K em todas as formas avaliadas ao longo dos 17 anos de condução do experimento. Independentemente da intensidade de pastejo, somente o K na forma prontamente disponível resultou em balanço de K positivo no solo, enquanto as demais formas do nutriente tiveram balanço negativo. A ausência de pastejo resultou em balanço de K positivo para todas as formas do nutriente e também para o seu teor total no solo.

Palavras-chave: potássio prontamente disponível, dessorção de potássio, ciclagem de potássio

¹Dissertação de Mestrado em Ciência do Solo – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS. (57p) – Março, 2019. O estudo foi realizado com o apoio do Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq).

POTASSIUM FORMS AND BALANCE IN AN OXISOL UNDER AN INTEGRATED CROP-LIVESTOCK SYSTEM IN NO-TILLAGE IN SOUTHERN BRAZIL¹

Author: Tauana Ferreira de Almeida
Adviser: Tales Tiecher
Co-advisor: Amanda Posselt Martins

ABSTRACT

Integrated crop livestock systems (ICLS) affect nutrient dynamics in the soil, among them, K. The research in ICLS areas is not recent, however, studies evaluating the effect of animal presence in different grazing intensities on the dynamics and the balance of the long-term K forms in these systems are scarce. The objective of this work was to evaluate the K forms in the soil over 17 years and the balance of this nutrient in an ICLS in no-tillage, with different grazing intensities (black oat + ryegrass) by cattle in the winter and soybean production in the summer harvest. The experiment was started in May 2001, in an area belonging to Espinilho's Farm in the municipality of São Miguel das Missões, RS, Brazil, in a Rhodic Hapludox (Oxisol). The treatments consisted of two grazing intensities, with intensive grazing (IG) and moderate grazing (MG) with 10 and 20 cm of pasture height, respectively, and a treatment without grazing (WG). The experimental design is a randomized block design with three replicates. Soil samples were collected in 2001, 2007, 2012 and 2017, in the layers of 0-5, 5-10, 10-15 and 15-20 cm of soil. Desorption of K was carried out using the Mehlich-1 extractor, and the nutrient contents were determined in a flame emission spectrophotometer. The total K was determined by X-ray fluorescence and the not available K was determined by the difference between the contents of total K and of potentially available K obtained by the desorption of K. The absence of cattle grazing generated an increase in the contents of readily and potentially available K forms, as well as of not available and total K forms in the soil. The grazing intensities tested in this study did not modify the K contents in all the evaluated forms during the 17 years of conduction of the experiment. Regardless of the grazing intensity, only the K in the readily available form resulted in a positive K balance in the soil, while the other K forms had a negative balance. The absence of grazing resulted in positive K balance for all forms of this nutrient and also for its total soil content.

Keywords: readily available potassium, potassium desorption, potassium cycling.

¹Master's dissertation in Soil Science. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS, Brazil. (57p) – March, 2019. This study was sponsored by the Brazilian National Research Council (CNPq).

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. ESTADO ATUAL DO CONHECIMENTO	4
2.1. Dinâmica do potássio no solo	4
2.2. Influência das raízes no potássio do solo	10
2.3. Potássio em sistemas integrados de produção agropecuária sob sistema plantio direto	12
3. HIPÓTESES	16
4. OBJETIVO	17
5. MATERIAL E MÉTODOS	18
5.1. Histórico da área experimental	18
5.2. Amostragem	23
5.3. Dessorção de potássio	24
5.4. Potássio não disponível e total	25
5.5. Balanço de potássio.....	26
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
6.1. Formas de potássio	27
6.2. Balanço de potássio.....	40
7. CONCLUSÕES	45

RELAÇÃO DE TABELAS

- Tabela 1.** Atributos químicos iniciais (novembro de 2000) do Latossolo Vermelho Distroférico típico da área do experimental. Fonte: Cassol (2003)..... 19
- Tabela 2.** Aplicação de nutrientes nitrogenados, fosfatados e potássicos nos tratamentos SP, PM e PI ao longo de 17 anos (soja e pastagem) na área experimental..... 22
- Tabela 3.** Produtividade da soja cultivada nas 17 safras agrícolas e produção de carne nos 17 ciclos de pastejo em sistema integrado de produção agropecuária 23
- Tabela 4.** Significância dos fatores de variação e suas interações com as formas de potássio no solo devido a análise de variância (ANOVA) 27

RELAÇÃO DE FIGURAS

- Figura 1.** Equilíbrio dinâmico entre as diferentes formas de potássio no solo, sua absorção pelas plantas e perdas por lixiviação ou erosão. 7
- Figura 2.** Croqui da área experimental com distribuição dos tratamentos das diferentes alturas do manejo do pasto. 20
- Figura 3.** Influência do pastejo intensivo (PI), pastejo moderado (PM) e ausência de pastejo (SP) no teor de potássio prontamente disponível (α) em quatro camadas de solo em 2001 (a), 2007 (b), 2012 (c) e 2017 (d), em um sistema integrado de produção agropecuária (SIPA) sob plantio direto no sul do Brasil. 29
- Figura 4.** Influência do pastejo intensivo (PI), pastejo moderado (PM) e ausência de pastejo (SP) na média do teor de K potencialmente disponível (β) em quatro camadas de solo em um sistema integrado de produção agropecuária (SIPA) sob plantio direto no Sul do Brasil..... 30
- Figura 5.** Teor de potássio (K) prontamente disponível (α) médio na camada de 0-20 cm, nos tratamentos com pastejo intensivo (PI), pastejo moderado (PM) e ausência de pastejo (SP), ao longo de 17 anos de condução de um sistema integrado de produção agropecuária (SIPA) em sistema plantio direto no Sul do Brasil. 31
- Figura 6.** Cinética de liberação de potássio (K) por extrações sucessivas, na média da camada de 0-20 cm, nos tratamentos com pastejo intensivo (PI), pastejo moderado (PM) e ausência de pastejo (SP), em um Latossolo Vermelho Distroférico típico, conduzido há 17 anos sob SIPA com diferentes intensidades de pastejo..... 33

Figura 7. Teor de potássio (K) potencialmente disponível (β) médio na camada 0-20 cm, nos tratamentos com pastejo intensivo (PI), pastejo moderado (PM) e ausência de pastejo (SP), ao longo de 17 anos de condução de um sistema integrado de produção agropecuária (SIPA) no Sul do Brasil.	34
Figura 8. Relação entre o resíduo da parte aérea da pastagem e o teor de K potencialmente disponível na média da camada de solo de 0 a 20 cm, após 12 anos (2013) de condução de um sistema integrado de produção agropecuária em plantio direto com diferentes intensidades de pastejo.	37
Figura 9. Taxa de dessorção constante do potássio em quatro camadas de solo (0-5, 5-10, 10-15 e 15-20), em diferentes intensidades de pastejo em um sistema integrado de produção agropecuária em plantio direto no Sul do Brasil..	38
Figura 10. Teores de K não disponível (a) e total (b) na média de quatro camadas (0-5, 5-10, 10-15 e 15-20) do solo no início e após 17 anos de instalação de um sistema integrado de produção agropecuária em plantio direto com diferentes intensidades de pastejo no Sul do Brasil.....	40

1. INTRODUÇÃO

Nas regiões tropicais e subtropicais, o sistema plantio direto emergiu como um dos mais efetivos esforços para melhorar a sustentabilidade ambiental dos agroecossistemas, visto que práticas inadequadas de uso e manejo do solo resultam em impactos negativos sobre os constituintes do solo e suas propriedades. No Brasil, a área sob plantio direto já ultrapassou 32 milhões de hectares (Conab, 2018) e vem expandindo-se exponencialmente desde 1993. Atualmente, aproximadamente 15,3 milhões de hectares são cultivados no sistema plantio direto na região subtropical brasileira, sendo cultivados principalmente com milho e soja no verão. No entanto, menos da metade dessa área recebe algum cultivo agrícola no período hibernar (Conab, 2018).

No estado do Rio Grande do Sul (RS), na última safra de verão, 6,4 milhões de hectares foram cultivados em semeadura direta no período estival com a cultura da soja e do milho, enquanto que no período hibernar o cultivo de cereais caiu para 900 mil hectares, representado principalmente pelo cultivo do trigo (Conab, 2018). Aproximadamente 5,5 milhões de hectares durante o período hibernar no RS permanecem em pousio ou com culturas de cobertura de alto potencial forrageiro, devido ao alto risco de frustração de safra com o trigo, além do histórico de baixo retorno econômico com essa cultura (Pereira et al., 2007). Assim, na busca pelo melhor aproveitamento e uso do solo e aumento da sustentabilidade dos sistemas agrícolas, a produção animal representa uma eficiente estratégia às propriedades agrícolas, resultando em sistemas conhecidos como sistemas integrados de

produção agropecuária (SIPA). Esses sistemas podem oferecer uma fonte de renda extra ao produtor, aumentando a eficiência do uso da terra, com a inserção do animal durante o período hibernal.

A baixa exploração pecuária nas áreas com culturas de cobertura de inverno, como aveia e azevém, se deve ao fato de a inserção do animal no sistema produtivo de grãos ainda ser vista com receio pelos produtores rurais, devido ao possível efeito negativo que os animais causariam à cultura de verão subsequente, em decorrência da compactação superficial do solo e da redução do aporte de resíduos no fim do período hibernal (Carvalho et al., 2011). No entanto, diversos estudos têm demonstrado que a boa gestão e o adequado manejo da carga animal em SIPA não acarretam em perdas para o produtor, tanto nos âmbitos econômico e produtivo (Moraes et al., 2014; Lopes et al., 2009; Martha Junior et al., 2011), quanto nos atributos do solo, sejam eles químicos (Flores et al., 2008; Ferreira et al., 2009; Martins et al., 2014), físicos (Conte et al., 2008; Cecagno et al., 2016), biológicos (Souza et al., 2010b; Chávez et al., 2011; Silva et al., 2011) e de qualidade do solo (Nicoloso et al., 2008; Souza et al., 2010a).

Estudos mostram que a presença do animal em áreas de SIPA resulta em maior retorno de potássio (K) ao solo via dejetos animal (Santos et al., 2003; Ferreira et al., 2009). Os animais influenciam a redistribuição de K no solo, pelo consumo deste nutriente via desfolhação da pastagem, e pelo seu retorno para o solo via excreção. O pastoreio promove o crescimento das raízes e pode aumentar a absorção de K das camadas mais profundas do solo (Santos et al., 2003; Ferreira et al., 2009). Garcia et al. (2008) destacam que espécies forrageiras sob pastejo são eficientes na extração e ciclagem de K no solo em sistema de rotação de culturas, e o retorno do K para a superfície do solo via excreta animal ou senescência das plantas pode beneficiar a safra de verão sucessora.

O K é um dos macronutrientes mais importantes para o crescimento das plantas e que mais limitam a produtividade das culturas no RS. Um levantamento recente feito com mais de 35 mil laudos de análise de solo no sul do Brasil demonstra que cerca de 1/3 das amostras apresentam teor de K disponível abaixo do teor crítico (Tiecher et al., 2016). Este nutriente tem alta mobilidade na planta e, embora não participe da estrutura química de compostos da planta, exerce

inúmeras funções reguladoras, como a ativação de enzimas e a participação em vários níveis do processo fotossintético, além de atuar na manutenção do turgor das células guarda, que são responsáveis pela abertura e fechamento dos estômatos (Taiz & Zeiger, 2004; Bissani et al., 2008).

Somente o íon potássio (K^+) presente na solução do solo é absorvido pelas plantas, sendo rapidamente abastecido pelo K prontamente disponível presente na região da rizosfera. Com a exaustão do K prontamente disponível da região rizosférica do solo cria-se um gradiente entre o K prontamente disponível e o K potencialmente disponível, facilitando a liberação deste último. Diversos estudos demonstram a contribuição das reservas de K do solo, que se encontram em formas mais dificilmente disponíveis (K potencialmente disponível e K não disponível), no crescimento e desenvolvimento das plantas (Hinsinger & Jaillard 1993; Paola et al., 2016). No entanto, o suprimento por essas formas de K é reduzida em solos mais intemperizados, como os Latossolos, por exemplo (Kuchenbuch, 1985; Rosolem et al., 1993; Paola et al., 2016), principalmente em função dos minerais presentes não contarem mais com esse nutriente em sua estrutura. Em função disso, nesses tipos de solos quase sempre a disponibilidade de K às plantas está muito relacionada às formas de K disponível, havendo pouca contribuição de outras formas não prontamente disponíveis. Além disso, a capacidade de troca de cátions (CTC), afeta diretamente a disponibilidade de K as plantas, visto que, com o aumento da CTC o poder tampão do solo também é aumentado, podendo reduzir as perdas de K por lixiviação (Meurer et al., 2018).

No entanto, Bertolazi et al. (2017) determinaram a presença de argilominerais 2:1 com hidróxi-Al entrecamada na área do presente estudo. Assim, embora alguns estudos realizados em SIPA tenham mostrado decréscimo no teor de K em áreas pastejadas e balanço de K negativo no solo (Ferreira et al., 2011; Martins et al., 2014), é importante verificar a contribuição de diferentes formas de K no solo, bem como, avaliar o balanço de longo prazo das formas de K no solo, a fim de se entender, como a presença do animal e suas diferentes intensidades de pastejo podem afetar a dinâmica das formas desse nutriente no solo.

2. ESTADO ATUAL DO CONHECIMENTO

2.1. Dinâmica do potássio no solo

O K encontra-se no solo em diferentes formas químicas. A mais abundante é como componente estrutural de minerais primários (feldspatos e micas) e secundários (ilita e vermiculita). Porém, o K também pode estar presente na forma não trocável ou potencialmente disponível (ocupando posições internas na entrecamada de argilominerais), na forma trocável ou prontamente disponível (ligado eletrostaticamente às cargas superficiais negativas dos colóides do solo como complexo de esfera externa – adsorção não-específica) ou na forma de nuvem de íons difusíveis (dupla camada difusa) (Sposito, 1989) e na forma iônica na solução do solo (Mengel & Kirkby, 1987; Sposito, 2008).

As diferentes características dos solos são resultantes dos fatores e processos pedogenéticos que atuam na formação deles. Variações na constituição mineralógica, na granulometria e também no grau de intemperismo sofrido pelo solo determinam o teor total de K presente no solo (Meurer et al. 2018). Assim, a presença de minerais primários fontes de K (micas e feldspatos), e predominância de argilominerais 2:1 nos informa que o solo é menos intemperizado, resultando em maiores reservas de K em formas potencialmente disponível e não disponível. Pelo contrário, solos com menor teor de minerais primários fontes de K e argilominerais 2:1, bem como, com predominância de argilominerais 1:1, indicam grau mais elevado de intemperismo, conseqüentemente reduzindo formas não

trocáveis e estrutural de K (Melo et al., 2016). Porém, mesmo em solos altamente intemperizados, com baixa fertilidade, como os Latossolos e Argissolos que ocorrem no Sul do Brasil, podem apresentar reservas de K, acessíveis as plantas (Moterle et al., 2016).

O teor de K no solo, nas diferentes formas que ele pode ser encontrado, varia de acordo com a mineralogia e grau de intemperismo. Ernani et al. (2007) observaram valores de K total em solos brasileiros variando de 300 até 39.000 mg kg⁻¹ de solo. O K na forma não disponível é responsável pela maior fração de K presente nos solos, variando de 90 a 98% do total de K (Meurer et al., 2018). Em estudo realizado em solos do Rio Grande do Sul, foi constatado que em média 97% do teor de K presente está na forma não disponível (Nachtigall & Vahl, 1989). Reações de dissolução liberam o K não disponível, retido fortemente a estrutura dos minerais pelas cargas originadas pela substituição isomórfica, e este processo é irreversível, enquanto que a liberação do K potencialmente disponível é uma reação reversível (Melo et al., 1995). A fração de K potencialmente disponível nos solos do Rio Grande do Sul pode variar de 0,4 a 4,8% da quantidade de K total (Mielniczuk & Selbach, 1978; Nachtigall & Vahl, 1989). Nachtigall & Vahl (1989), em estudo realizado em solos do Rio Grande do Sul, obtiveram valores médios para K prontamente disponível correspondente a 0,9% do total de K. Além disso, Tisdale & Nelson (1993) afirmam que o teor de K prontamente disponível pode chegar a 600 mg kg⁻¹. Ernani et al. (2007) verificaram em solos brasileiros variação de 10 a 393 mg kg⁻¹ de K prontamente disponível. Em relação ao conteúdo total de K presente em solos brasileiros, a fração do nutriente presente na solução do solo variou de 0,4 a 22,5 mg L⁻¹ (Meurer & Anghinoni, 1994). O conteúdo de K presente na solução do solo é a forma mais prontamente disponível, sendo suprida rapidamente pelo K trocável ligado eletrostaticamente às cargas superficiais negativas dos colóides do solo como complexo de esfera externa. O conteúdo de água no solo atua como um regulador da concentração de K⁺ na solução e este pode ser facilmente lixiviável, principalmente em solos com baixa capacidade de troca de cátions (CTC) (Martin & Sparks, 1985).

A absorção pelas plantas ocorre a partir do íon K da solução do solo, que está em equilíbrio com as demais formas do nutriente no solo. Todas as formas de

K presentes no solo podem ser liberadas para a solução do solo, pois todas estão interligadas através deste equilíbrio dinâmico. Porém, a mineralogia de cada solo, bem como as reações químicas de dissolução dos minerais envolvidas é que vão determinar a velocidade de liberação do K das formas mais dificilmente disponíveis. Quando ocorre redução no teor de K da solução do solo, devido à absorção pelas plantas ou até mesmo pela remoção deste nutriente devido à lixiviação ou escoamento superficial, este é repostado pela fase sólida do solo, sendo reestabelecido o equilíbrio. Primeiramente, esta reposição ocorrerá pelo K trocável ou prontamente disponível, que por sua vez está em equilíbrio com o K que está fixado na entrecamada dos argilominerais. No entanto, o K nessa forma só será liberado quando a concentração de K na solução estiver muito baixa e a fase prontamente disponível estiver se esgotando. Como última fonte de reposição das formas de K, tem-se o K não disponível (Martin & Sparks, 1985; Sposito, 2008). Porém, apesar deste equilíbrio, o K não disponível dificilmente vai contribuir para a nutrição das plantas no curto prazo, especialmente em culturas anuais. A liberação do K não disponível é extremamente lenta, representando a reserva de K no solo, ou seja, a disponibilidade de K a longo prazo (Sparks & Huang, 1985). Dessa forma, pode-se dizer que a disponibilidade de K às plantas depende principalmente dos minerais presentes na fase sólida do solo e não somente da solução do solo, de onde as plantas absorvem o nutriente (Mengel & Kirkby, 1987). O equilíbrio dinâmico entre as diferentes formas de K, sua absorção pelas plantas e suas perdas por lixiviação ou erosão, bem como a sua fixação na entrecamada de argilominerais 2:1, podem ser visualizados na Figura 1.

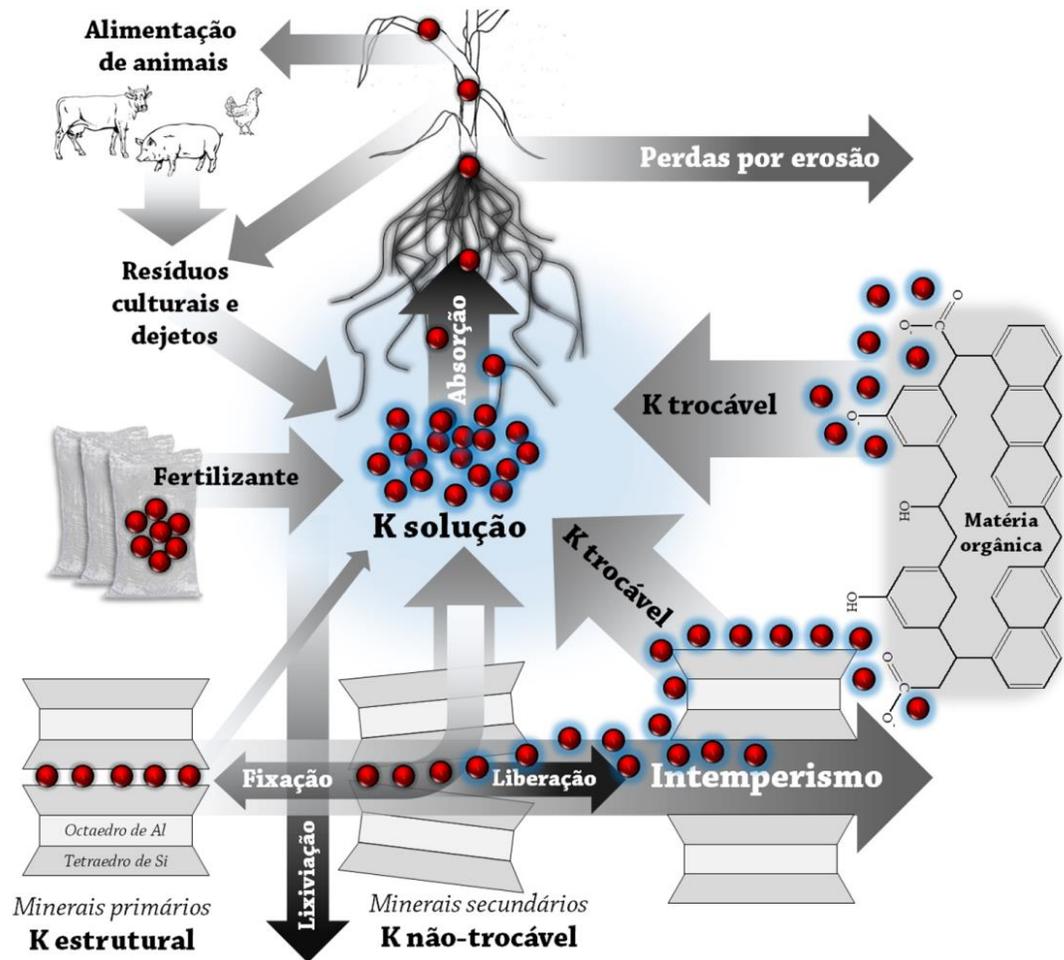


Figura 1. Equilíbrio dinâmico entre as diferentes formas de potássio no solo, sua absorção pelas plantas e perdas por lixiviação ou erosão, conforme Meurer et al. (2018).

A adição de K ao solo ocorre via fertilizantes e a ciclagem de K, ou seja, o retorno deste nutriente ao solo ocorre via resíduos culturais, enquanto os dejetos animais são responsáveis pela redistribuição de K na área (Figura 1). Em ambientes com presença de argilominerais 2:1 (vermiculita, illita ou montmorilonita, por exemplo), se houver excesso de fertilização potássica ou no retorno de K ao solo pela urina dos animais, que é muito concentrada em K, pode ocorrer fixação deste nutriente nas entrecamadas desses minerais (Van Raij, 1981). Nessas condições, quando a solução do solo está saturada por este nutriente, o K desloca-se da solução do solo para as formas trocáveis/prontamente disponíveis, ou seja, ligando-se às cargas elétricas negativas do solo. Quando esta forma também se encontra

saturada, o K pode ser fixado entre lâminas tetraédricas de minerais de argila do tipo 2:1, como por exemplo vermiculita e interestratificados, estabelecendo um novo equilíbrio. Rosolem et al. (2006) verificaram que tanto o K liberado de resíduos culturais quanto o K adicionado via fertilizante proporcionaram elevação no teor de K potencialmente disponível no solo. No entanto, após estabelecido este equilíbrio, ou seja, quando a força de hidratação do íon é excedida pela força de ligação dos minerais 2:1, ocorre a desidratação do K e este é ajustado nos retículos ditrigonais da lâmina tetraédrica, resultando no colapso da estrutura do mineral e tornando a liberação do K novamente desses sítios muito lenta (Barber, 1995).

A definição do K total é a soma de todas as formas em que o elemento se encontra no solo: K-não disponível + K-potencialmente disponível ou K-não trocável + K-prontamente disponível ou K-trocável + K-solução. Como o K presente na solução do solo é o primeiro a ser exaurido e é extraído junto com o K-trocável, ele pode ser considerado também como K-prontamente disponível. Diferentes métodos e extratores químicos têm sido empregados para avaliar os teores de K no solo, em suas diferentes formas e graus de disponibilidade para as plantas. Nos laboratórios de análises de solo do Brasil, os principais métodos utilizados para avaliar a disponibilidade (K-prontamente disponível) do K para as plantas são o Mehlich-1 ($\text{HCl } 0,05 \text{ mol L}^{-1} + \text{H}_2\text{SO}_4 \text{ } 0,0125 \text{ mol L}^{-1}$) e o acetato de amônio 1 mol L^{-1} tamponado a pH 7,0. O extrator Mehlich-1 extrai o K ligado aos grupos funcionais do solo, deslocando o K pelos íons H^+ adicionados via solução extratora; além disso esse extrator solubiliza parcialmente a superfície externa dos colóides do solo. No entanto, esses métodos, isoladamente, não têm se mostrado adequados para estimar a disponibilidade desse nutriente às plantas, subestimando estes valores, visto que na rizosfera a dinâmica da disponibilidade de K é diferente da que ocorre no restante do solo (Ritchey, 1982). O acetato de amônio é um extrator com alta concentração do cátion NH_4^+ que desloca os cátions adsorvidos pela fase sólida para a fase líquida do solo (Pansu & Gautheyrou, 2006).

Para avaliar a capacidade de suprimento de K às plantas pelas formas não trocáveis/potencialmente disponíveis deste nutriente no solo, os principais métodos utilizados são o $\text{HNO}_3 \text{ } 1 \text{ mol L}^{-1}$ fervente (Pratt, 1973), o tetrafenilborato de sódio (NaTPB) (Shulte & Corey, 1965) e a extração por cultivos sucessivos (Mielniczuk &

Selbach, 1978). A extração de K usando NaTPB varia de acordo com o tempo de contato entre o solo e a solução, sendo que quanto maior o tempo de contato maior será a quantidade de K extraída. Moody & Bell (2006) afirmam que a quantidade de K acessível pelas plantas é o correspondente a 1 hora de extração com NaTPB. O extrator HNO_3 é bastante utilizado na Região Sul do Brasil, apresentando boa eficiência e boa correlação com o teor de K absorvido pelas plantas em cultivos sucessivos, principalmente em solos mais intemperizados, como os Latossolos (Mielniczuk & Selbach, 1978). Nachtigall & Vall (1991) observaram correlação entre os valores de K extraído em cultivos sucessivos e os valores de K extraído com HNO_3 1,0 mol L⁻¹ fervente, em pesquisa com 44 amostras de solos da Região Sul do estado do Rio Grande do Sul.

Outra alternativa para avaliar disponibilidade de K é a avaliação da cinética de liberação de K em solos, obtida por meio de extrações sucessivas (dessorção). Para esta determinação, podem ser utilizados a resina trocadora de cátions (RTC) (Martin & Sparks, 1985; Dhillon & Dhillon, 1990) e ácidos orgânicos, como o cítrico ou o oxálico (Mehta et al., 1995). Meurer & Rosso (1997), em estudo utilizando três tipos de solo no estado do Rio Grande do Sul, utilizaram o método de extrações sucessivas com RTC para determinar o teor de K prontamente e potencialmente disponível nestes solos. Neste mesmo estudo, as quantidades de K potencialmente disponível extraídas com a resina trocadora de cátions foram inferiores às quantidades do nutriente extraídas com HNO_3 1,0 mol L⁻¹ fervente. É provável que isso ocorreu devido ao HNO_3 ser um ácido forte, tendo a capacidade de dissolver parte do K não disponível e, assim, superestimando o teor de K potencialmente disponível (Martin & Sparks, 1985). Em estudo realizado com dois solos do Rio Grande do Sul, um Gleissolo Háplico e um Chernossolo Ebânico, Meurer & Castilhos (2001) avaliaram as quantidades de K extraídas sequencialmente utilizando como extrator o ácido oxálico em um Gleissolo Háplico e em um Chernossolo Ebânico. Nas amostras de ambos os solos, as quantidades de K liberadas representaram menos que 7% do teor de K total.

Para determinação do teor de K total do solo é utilizado ácido fluorídrico (HF), que promove a liberação e solubilização do K contido na estrutura dos minerais do solo. A análise por fluorescência de raio-X também é uma alternativa

para determinação do teor total de K do solo. Esta, ao contrário da extração com HF, tem a vantagem de não gerar resíduos.

2.2. Influência das raízes no potássio do solo

As plantas são capazes de modificar quimicamente o volume de solo sob influência de suas raízes, na zona conhecida como rizosfera (Moreira & Siqueira, 2002; Uren, 2007). A palavra “rizosfera”, de origem grega, significa “a influência de uma raiz em seu entorno” (Pinton & Varinini, 2001), e foi citada pela primeira vez em 1904 pelo cientista alemão Lorenz Hiltner, a fim de descrever a interação entre microorganismos e raízes de plantas leguminosas (Fageria & Stone, 2006). Não há um consenso sobre a extensão de solo que sofre efeito das raízes. Mengel et al. (2001) consideram que ela se estende de 1 a 3 mm a partir da superfície da raiz. Jungk & Claassen (1997) e Jones et al. (2003) consideram que as mudanças induzidas pelas raízes podem variar de uma distância de poucos micrômetros até sete milímetros da superfície radicular, dependendo da textura e estrutura do solo, das espécies das plantas, do manejo da área e da distribuição de precipitações.

Como resultado da atividade radicular e microbiana, as modificações que ocorrem na rizosfera podem ser consideradas essencialmente biológicas. No entanto, acarretam modificações nos atributos químicos, físicos e biológicos do solo (Uren, 2007). No que diz respeito à química do solo, essas modificações podem ser oriundas da relação entre cátions e ânions absorvidos pela planta, alterando o pH e a concentração de nutrientes (Marschner, 1995) e a exsudação radicular de compostos orgânicos ou sua produção pelos microorganismos que habitam essa zona (Jones, 1998; Lynch & Whipps, 1990; Fageria et al., 2016). Muitos trabalhos já demonstraram que podem haver inúmeras diferenças entre o solo com e sem influência de raízes (Gobran et al. 1998; Corti et al. 2005; Philips & Fahey, 2008).

Assim como no solo, na região da rizosfera o K também pode ser encontrado em diferentes formas: na solução do solo, como íon livre K^+ ; adsorvido nos minerais de argila e na matéria orgânica (MO) do solo como complexo de esfera externa; retido na entrecamada dos minerais de argila como complexo de esfera interna; e, na forma não disponível (Sposito, 1984; Sparks & Huang, 1985). A

concentração do íon K na solução do solo, a demanda criada pelo crescimento vegetal e a capacidade de absorção das raízes são os fatores que determinam a taxa de absorção do K. Fluxo de massa e difusão são os mecanismos pelos quais o K chega até a superfície das raízes. Geralmente a absorção vegetal é maior que o fornecimento do nutriente por fluxo de massa, o que resulta em uma depleção na concentração do nutriente na solução do solo na rizosfera. Nesse caso o mecanismo de difusão passa a contribuir com o fornecimento de K às plantas (Barber, 1995).

A perda de células do ápice radicular, decomposição de raízes mortas e até mesmo o processo de suprimento de nutrientes por difusão e fluxo de massa fazem com que na rizosfera a concentração de nutrientes seja maior do que aquela encontrada nas demais regiões do solo (Gobran et al., 1998; Violante & Caporale, 2015). É criado um gradiente de concentração de íons no solo devido à absorção de água e nutrientes pelas raízes alterando o equilíbrio iônico entre a fase sólida e a fase líquida do solo da região rizosférica (Marschner, 1995; Jungk, 2002; Neumann & Römheld, 2002). A absorção radicular exaure o K da solução (Niebes et al., 1993), sendo este repostado pelo K prontamente disponível rizosférico que também vem a ser exaurido (Kuchenbuch & Jungk, 1982). A exaustão do K junto à superfície radicular origina um gradiente de concentração entre o K prontamente disponível e o K potencialmente disponível, provocando, conseqüentemente, a liberação de K potencialmente disponível (Hinsinger & Jaillard, 1993; Kaminski et al., 2007), podendo, inclusive, induzir a transformação de argilominerais após curtos períodos de cultivo (Paola et al., 2016). Hinsinger & Jaillard (1993) relataram que a liberação de prótons pelas raízes de colza causou a dissolução da estrutura da flogopita ($\text{KMg}_3\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH}, \text{F})_2$) na rizosfera.

A absorção de K pelas plantas é geralmente maior que a quantidade inicial de K prontamente disponível do solo, indicando que outras formas (potencialmente disponível e não disponível) contribuem para o suprimento deste mineral às plantas (Moterle et al., 2016). Hinsinger et al. (1993) constataram a transformação de mica em vermiculita e VHE na rizosfera de *Brassica napus*. Em experimento a campo, a longo prazo, foi verificada a transformação de illita em esmectita e interestratificados (Tributh et al., 1987). Em solo deficiente em K, a forma potencialmente disponível

deste nutriente contribuiu com 85% do total absorvido por plantas de colza com sete dias de idade e a baixa concentração de K na solução do solo provocou liberação de K da mica presente na rizosfera (Kuchembuch, 1985). Após oito dias de cultivo, ocorreu acentuada diminuição do teor de K em frações granulométricas na rizosfera de plantas de *Brassica napus* cv. Drakkar (Niebes et al., 1993). Segundo esses autores, o provável mecanismo que induziu a transformação foi a excreção de prótons, que causou a diminuição do pH da rizosfera, provocando a dissolução do mineral. Kuchenbuch (1985) afirmou que a frequente razão das relações pouco significativas encontradas entre os resultados das análises convencionais de solo, do rendimento das plantas e das adubações potássicas é a contribuição do K potencialmente disponível no suprimento do nutriente as raízes.

Em um experimento de campo, cultivado com milho, na Itália, Paola et al. (2016) demonstraram que existe liberação de K de argilominerais em curto prazo. Os resultados mostram que durante o crescimento das plantas ocorre a liberação do K (40 dias após a semeadura) e no solo da rizosfera em comparação com o solo não-rizosférico a estrutura da illita é modificada. Segundo os autores, a liberação de K pela modificação na mineralogia da fração argila já pode ser observada em apenas uma estação de crescimento e que íons de K podem ser extraídos pelas plantas das entrecamadas dos argilominerais 2:1 e novamente fixados após a deposição dos resíduos culturais no solo, ao final de uma estação de crescimento. Além disso, o pastejo estimula a produção e o crescimento de raízes, devido à renovação da parte aérea. Dessa forma, as raízes podem acessar maior volume de solo, em camadas mais profundas e em formas menos disponíveis (Moraes et al., 2013).

2.3. Potássio em sistemas integrados de produção agropecuária sob sistema plantio direto

Os modelos de produção integrada não são recentes, pois a integração dos cultivos com a produção animal se faz desde a domesticação das plantas e dos animais. No Brasil, há diferentes sistemas integrados de produção agropecuária (SIPA), com diferentes características e que visam objetivos diferentes. No Cerrado

Brasileiro, a produção integrada é utilizada na recuperação de solos em áreas de pastagens degradadas. O excesso de lotação e a ausência da adubação de manutenção empobrece a fertilidade do solo. A agricultura é então associada a pecuária por alguns ciclos e a renda proveniente da produção agrícola é utilizada para pagar os custos de adubação. A fertilidade do solo é melhorada com a adubação que é adicionada na fase lavoura (Zimmer et al., 2004).

A necessidade de aumentar o acúmulo de biomassa também origina a produção integrada. Nesse caso, é a pecuária que se associa a agricultura, devido as plantas forrageiras terem alto potencial de acumular biomassa, essas melhoram a cobertura do solo quando somente as culturas agrícolas não são capazes de acumular biomassa suficiente para isso. A necessidade do acúmulo de biomassa juntamente com o aproveitamento de nutrientes preconiza os sistemas denominados “Barreirão” e “Santa Fé” (Carvalho et al., 2006).

Na região subtropical brasileira, a rotação de culturas preconiza a produção integrada. Com a perda do interesse por parte dos produtores em culturas de inverno, devido a problemas sanitários, custos de produção e preço de mercado (Pereira et al., 2007), plantas forrageiras de inverno atreladas ao pastejo surgiram como uma opção.

Os sistemas integrados de produção agropecuária (SIPA) são sistemas onde há alternância temporária ou rotação do cultivo de grãos e pastejo de animais na mesma área, ao longo do tempo (Moraes et al., 2013). Estes visam obter o sinergismo do sistema de rotação de culturas (Martins et al., 2015) e já vêm sendo utilizados em mais de 2,5 bilhões de hectares pelo mundo (Bell & Moore, 2012). Segundo Anghinoni et al. (2013), o sinergismo entre os SIPA e o plantio direto contribui para aumentar os teores de matéria orgânica do solo e, conseqüentemente, aumenta a fertilidade do solo e os estoques de nutrientes. Do ponto de vista econômico, os SIPA, devido a maior diversificação que propiciam ao sistema, atuam também na redução dos riscos para as propriedades rurais (Martha Júnior et al., 2011). Em SIPA, a intensidade de pastejo é o fator mais importante para determinar o impacto que o animal poderá causar no ambiente (Carvalho et al., 2007). A quantidade de nutrientes ciclados tanto pela pastagem quanto pelas excretas dos animais e a quantidade de resíduo que permanecerá sobre o solo,

bem como a intensidade do pisoteio animal são determinados pela intensidade de pastejo. Para a condução de um SIPA mais sustentável, a intensidade de pastejo moderada tem sido a mais indicada (Kunrath et al., 2015; Martins et al., 2014), garantindo o pastejo em forragem de alta qualidade, bem como boa produção de forragem com eficiente ciclagem de nutrientes.

O K pode ser perdido por lixiviação ou erosão no sedimento carreado do solo e pela água de escoamento superficial. Em semeadura direta, as perdas de solo são minimizadas, porém ainda podem ocorrer perdas significativas deste nutriente por escoamento superficial, especialmente quando a adubação é feita a lanço (Mielniczuk, 2005). Em SIPA, os animais atuam como catalisadores através do pastejo, modificando e acelerando o fluxo de nutrientes através da ingestão de biomassa vegetal e do retorno de 70-95% dos nutrientes da planta ao solo, via urina e esterco (Russelle, 1997; Nascimento Jr. & Cavalcante, 2001). A exportação de nutrientes via produto animal (carne, leite, lã, etc.) é baixa, variando de 5 a 30% do total ingerido (Rotz et al., 2005). Assim, os SIPA, juntamente com a prática do plantio direto, podem minimizar as perdas de K nesses sistemas.

Souto (2006) relatou aumento nos teores de K trocável ao final da estação de pastejo em relação a antes da entrada dos animais na área. Do total de K ingerido pelos animais durante o período de pastejo, cerca de 90% retorna para o solo; deste total, cerca de 70 a 90% é excretado via urina, na forma iônica, prontamente disponível para absorção pelas plantas (Haynes & Williams, 1993). Em estudo realizado em área de SIPA sob semeadura direta no sul do Brasil, Ferreira et al. (2009) verificaram maior teor de K após a pastagem do que após o cultivo de soja. O teor de K prontamente disponível no solo após a pastagem foi duas vezes superior ao teor deste nutriente após o cultivo da soja, devido tanto aos dejetos animais retornarem praticamente todo o K absorvido durante o pastejo dos animais ao solo quanto ao retorno do K presente no resíduo vegetal da pastagem, bem como devido a maior exportação de K via grãos de soja. A soja absorve e exporta altos teores de K no grão (Ferreira et al., 2011), sendo ciclados pelo resíduo da cultura cerca de 30 kg ha⁻¹ (Arnuti, 2018).

A ciclagem do K constitui o movimento deste nutriente entre os compartimentos (solo-planta-animal-atmosfera) do sistema, envolvendo uma série

de processos biogeoquímicos (Anghinoni et al., 2011). No SIPA, a presença do animal no sistema modifica as taxas e fluxos do K, visto que o animal atua como um catalizador dos processos (Anghinoni et al., 2013). Quando Ferreira et al. (2011) estudaram a ciclagem de K em diferentes intensidades de pastejo, os autores observaram que os tratamentos com maiores intensidades de pastejo foram os que tiveram maior ciclagem de K, enquanto no tratamento sem pastejo ocorreu o inverso. Devido à excreção animal ser um meio de retorno dos nutrientes ao sistema, a maior ciclagem pode reduzir as perdas de K que, no longo prazo, pode acarretar em menor necessidade de K via adubação potássica (Russelle et al., 2007).

Apesar das publicações de trabalhos tendo como tema central a ciclagem de nutrientes em SIPA, estudos sobre o balanço e as formas de K no solo sob SIPA são escassos. Esses estudos podem contribuir para o melhor entendimento da disponibilidade e da dinâmica deste nutriente neste sistema ao longo do tempo, o que auxilia no entendimento da eficiência do SIPA, a longo prazo, em disponibilizar K para as plantas e entender sua dinâmica no solo. Tais informações devem servir de base para orientação aos produtores na diversificação de suas propriedades, para potencializar a utilização dos recursos naturais de forma sustentável, e também de subsídio para recomendações de adubações diferenciadas para os sistemas integrados.

3. HIPÓTESES

A presença do animal em diferentes intensidades de pastejo e o cultivo de soja em um sistema integrado de produção agropecuária é capaz de alterar as formas de K no solo, havendo maior contribuição de formas não prontamente disponíveis.

Devido ao processo de entradas e saídas de nutrientes, o sistema integrado de produção agropecuária apresenta um balanço de K no solo com saldo positivo, após 17 anos de condução.

4. OBJETIVO

Avaliar as formas e o balanço de K no solo, após 17 anos da adoção de um sistema integrado de produção agropecuária com produção de soja e bovinos de corte em um Latossolo sob plantio direto no sul do Brasil.

5. MATERIAL E MÉTODOS

5.1. Histórico da área experimental

Os estudos referentes ao presente trabalho foram desenvolvidos na região do Planalto Rio-Grandense, no município de São Miguel das Missões (RS) (29°03'10" S latitude, 53°50'44" O longitude), o experimento está sendo conduzido na Fazenda do Espinilho (Agropecuária Cerro Coroado). A propriedade também abrange os municípios de Tupanciretã e Jóia, situada na região fisiográfica do Planalto, com altitude aproximada de 400 m. O local do experimento tem 465 m de altitude. Segundo a classificação de Köppen (KOTTEK et al., 2006) o clima é caracterizado como subtropical úmido e quente (Cfa), com temperatura média anual de 19° e sendo a precipitação média anual de 1.673 mm (INMET, 2017). A localização do experimento na paisagem é topo de colina, com declividade entre 0,02 e 0,10 m m⁻¹ e o relevo é suavemente ondulado a ondulado.

O solo é caracterizado como Latossolo Vermelho Distroférrico típico (EMBRAPA, 2006), da unidade de mapeamento Santo Ângelo (Streck et al., 2008), profundo, bem drenado, com coloração vermelho-escura e tendo textura argilosa, com 540 g kg⁻¹ de argila, 270 g kg⁻¹ de silte e 190 g kg⁻¹ de areia no horizonte A da camada superficial. Os teores de Fe, Si e Al solúvel em ditionito-citrato-bicarbonato, até a profundidade de 40 cm, são em média de 153,2; 3,1 e 19,7 g kg⁻¹, respectivamente. Caulinita e argilominerais 2:1 foram identificados na fração < 2µm nos tratamentos sem pastejo (SP) e pastejo intensivo (PI) (Bertolazi et al., 2017). A

ausência de expansão das camadas dos argilominerais 2:1 foi identificada, sendo estes identificados como vermiculita com hidroxí-entrecamada (Bertolazzi et al., 2017).

Originalmente, a área era campo nativo típico do Planalto Médio gaúcho, sendo composto principalmente por *Paspalum* spp. e *Axonopus* spp. em meio a touceiras de *Aristida* spp., vegetação característica de solos pobres e ácidos. A área foi convertida em lavoura entre as décadas de 1960 e 1970. Anteriormente à instalação do experimento, a área vinha sendo cultivada em semeadura direta desde 1993. O sistema implantado contava com a cultura da soja (*Glycine max* (L.) Merrill), para produção de grãos no verão e aveia preta (*Avena strigosa* Schreb.) para a produção de sementes no inverno. O experimento teve início em novembro de 2000, quando a soja foi implantada. Previamente à instalação do experimento, o solo foi analisado (Tabela 1). Em junho de 2001, ocorreu a primeira entrada dos animais na área, que é de aproximadamente 22 hectares, dando início ao sistema que consiste em pastagem de aveia-preta + azevém (*Lolium multiflorum* Lam.) no período hibernal, compreendido de maio a novembro, e soja no período estival, compreendido de novembro a maio.

Tabela 1. Atributos químicos iniciais (novembro de 2000) do Latossolo Vermelho Distroférico típico da área do experimental (Cassol, 2003)

Camada de solo	pH-H ₂ O	C org. ^a	Ca ^b	Mg ^b	Al ^b	H+Al ^c	CTC pH 7,0	K ^d	P ^d
cm		g kg ⁻¹					cmol _c kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	
0-5	4,9	24	6,2	1,3	0,3	8,7	16,2	240	13
5-10	4,6	20	4,8	1,8	0,6	9,7	16,3	119	10
10-15	4,6	15	4,1	2,2	0,7	9,7	16,0	88	5
15-20	4,6	15	4	1,1	1,0	10,1	15,2	55	4

^a Carbono orgânico (Walkley-Black); ^b Cálcio, magnésio e alumínio trocáveis (KCl 1 mol L⁻¹); ^c Acidez potencial estimada pelo Índice SMP; ^d Potássio e fósforo disponíveis (Mehlich⁻¹).

Os tratamentos consistem de diferentes intensidades de pastejo no período hibernal, conforme a altura de manejo do pasto, sendo considerados pastejo intenso (10 cm de altura de pasto), pastejo moderado (20 e 30 cm de altura de pasto) e

pastejo leve (40 cm de altura de pasto). Como testemunhas sem pastejo, utiliza-se áreas entre os blocos onde não ocorre a entrada dos animais. A área total é dividida em 12 parcelas com áreas que variam entre 0,8 e 3,6 hectares. O delineamento experimental utilizado é o de blocos ao acaso com três repetições (Figura 2).



Figura 2. Croqui da área experimental com distribuição dos tratamentos das diferentes alturas do manejo do pasto (Martins et al., 2015).

O sistema consta da produção integrada de bovinos de corte na pastagem de inverno e soja no verão, em plantio direto. São utilizados bovinos jovens, machos e castrados, com idade ao redor de 12 meses, oriundos de cruzamentos entre as raças Angus, Hereford e Nelore, sem grau de sangue definido e com peso vivo (PV) médio inicial ao redor de 200 kg, simulando um sistema de recria de novilhos ou terminação de animais jovens.

Durante os ciclos de pastejo, a alimentação dos animais é baseada apenas na pastagem mista de aveia preta + azevém, com fornecimento de sal mineral em cochos. O método de pastejo adotado é o contínuo com no mínimo três bovinos permanentes por parcela (animais teste) e número variável de animais reguladores. A entrada dos animais na área ocorre quando o pasto atinge um acúmulo médio de 1500 kg ha⁻¹ de matéria seca (MS) e cerca de 25 cm de altura. Assim, geralmente o ciclo de pastejo inicia na primeira quinzena de julho e se estende até a primeira quinzena de novembro, totalizando 120 dias de pastejo, em média. A altura do pasto é acompanhada a cada 15 dias por meio de um bastão graduado (*Sward stick*), cujo marcador corre por uma “régua” até tocar a primeira lâmina foliar da pastagem, procedendo-se então a leitura da altura. Em cada parcela, realiza-se cerca de 100 leituras (pontos), em caminhamento aleatório, a fim de definir a altura média do

pasto (altura entre o primeiro toque da lâmina móvel nas folhas e o solo). O manejo para obtenção da altura média desejada ocorre variando-se a carga animal: retira-se parte dos animais das parcelas quando a altura do pasto está inferior à desejada, e vice-versa. Ao final de cada ciclo de pastejo a área é dessecada com glifosato ($900 \text{ g i.a. ha}^{-1}$) e chlorimuron etílico ($37,5 \text{ g i.a. ha}^{-1}$).

Entre novembro e dezembro de cada ano ocorre a semeadura da soja com sementes inoculadas com rizóbio na dose recomendada para o produto em questão. A soja é geralmente colhida entre abril e maio do ano seguinte. O manejo da soja é feito de acordo com as recomendações técnicas para a região (uso de inseticidas, herbicidas, fungicidas etc.). A colheita da soja ocorre entre os meses de abril e maio.

Após o primeiro ciclo de pastejo e antecedendo a implantação do primeiro ciclo da soja (novembro de 2001), foram aplicadas, na superfície do solo de toda a área experimental, $4,5 \text{ Mg ha}^{-1}$ de calcário dolomítico comercial (PRNT 62%), equivalente a $\frac{1}{2}$ SMP para atingir pH-H₂O de 5,5, dose recomendada de acordo com a CQFS-RS/SC (1995) para elevar o pH do solo na camada de 0-10 cm na condição da área. A adubação foi a mesma em todos os tratamentos ao longo do tempo. A adubação foi realizada da seguinte maneira: foi feita aplicação de N para a pastagem e de P e K para a soja até o ano de 2011 (Tabela 2). A partir de 2012, a adubação foi feita somente na fase pastagem, considerando as análises de solo, em doses para a produtividade entre $7,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ de MS de pasto e de $4,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ de grãos de soja (CQFS-RS/SC (2004). Em relação às fontes, para o N foi utilizado sempre ureia; para o P utilizou-se superfosfato simples no primeiro ciclo da soja e da pastagem e, nos demais, superfosfato triplo; e, para o K, foi sempre utilizado cloreto de potássio.

Tabela 2. Aplicação de nutrientes nitrogenados, fosfatados e potássicos nos tratamentos SP, PM e PI ao longo de 17 anos (soja e pastagem) na área experimental

Safras	Fase soja		Fase pastagem		
	P ₂ O ₅ ^a	K ₂ O ^b	N ^c	P ₂ O ₅	K ₂ O
Doses de nutrientes (kg ha ⁻¹)					
2001/02	60	NA	45	NA	NA
2002/03	60	90	45	60	NA
2003/04	60	60	90	NA	NA
2004/05	60	90	45	NA	NA
2005/06	60	90	45	NA	NA
2006/07	60	90	45	NA	NA
2007/08	60	60	45	NA	NA
2008/09	60	60	45	NA	NA
2009/10	60	60	90	NA	NA
2010/11	60	60	45	NA	NA
2011/12	60	60	90	NA	NA
2012/13	NA	NA	140	60	60
2013/14	NA	NA	140	60	60
2014/15	NA	NA	140	60	90
2015/16	NA	NA	NA	NA	NA
2016/17	NA	NA	112	60	90
Total	660	720	1162	300	330

^a A fonte utilizada foi superfosfato simples na primeira estação de soja (2001/02) e na segunda estação forrageira (2002); e nos demais anos, foi aplicado superfosfato triplo.

^b A fonte utilizada foi o cloreto de potássio.

^c A fonte utilizada foi a ureia. Taxa de N superiores a 45 kg ha⁻¹ foram separadas em duas aplicações, aos 30 e aos 60 dias após o estabelecimento da forragem.

NA = não adubado

A produtividade de soja para os tratamentos com PI, PM e SP e a produção de carne para os tratamentos com PI e PM são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Produtividade da soja cultivada nas 17 safras agrícolas e produção de carne nos 17 ciclos de pastejo em sistema integrado de produção agropecuária

Safra	Produtividade de soja (Mg ha ⁻¹)			Produção de carne (kg PV ha ⁻¹)		
	SP	PM	PI	SP	PM	PI
2001/02	3,63	2,58	2,47	0	310,7	480,3
2002/03	4,05	3,81	3,69	0	537,0	541,0
2003/04	3,10	2,95	2,95	0	420,4	489,8
2004/05	1,20	1,30	1,29	0	489,7	530,0
2005/06	1,70	2,03	1,85	0	385,3	514,7
2006/07	3,71	3,53	3,55	0	495,6	611,9
2007/08	2,65	2,56	3,33	0	501,0	428,3
2008/09	3,10	2,95	2,95	0	420,4	489,8
2009/10	3,44	3,30	3,27	0	389,8	529,3
2010/11	3,33	2,95	3,27	0	375,1	529,3
2011/12	0,39	0,30	0,23	0	342,7	314,4
2012/13	3,10	2,95	2,95	0	420,4	489,8
2013/14	3,43	3,37	3,44	0	344,3	423,3
2014/15	3,50	3,65	3,67	0	464,3	545,3
2015/16	3,77	3,70	3,13	0	456,0	600,9
2016/17	4,16	4,12	3,93	0	475,3	635,3
2017/18	4,43	4,05	4,14	0	318,7	172,5

5.2. Amostragem

A descrição e caracterização do protocolo experimental a que se refere o presente estudo foram apresentadas no Item 5.1. Para este estudo, foram utilizadas amostras coletadas das parcelas dos tratamentos com 20 cm (PM) e com 10 cm (PI) de altura de pasto, representando SIPAs com pastejo moderado e pastejo intensivo, respectivamente, e como testemunha as áreas de exclusão de pastejo (SP). Assim, após a colheita da soja (maio), nas safras agrícolas 2000/01, 2006/07, 2011/12 e 2016/17 foi feita a amostragem do solo utilizando-se pá de corte. As amostras foram coletadas em quatro camadas de solo: 0 a 5; 5 a 10; 10 a 15 e 15 a 20 cm. Para cada parcela experimental, utilizou-se seis subamostras para compor uma amostra de solo. Após as coletas, as amostras foram acondicionadas em sacos plásticos.

5.3. Dessorção de potássio

Nestas amostras, foi determinada a capacidade de dessorção de K do solo utilizando-se o extrator Mehlich-1. Este procedimento consistiu em acondicionar 1,0 g de solo seco ao ar em tubos Falcon, no qual se adicionou-se 10 mL de solução extratora Mehlich-1. As amostras foram agitadas por cinco minutos em agitador horizontal e deixadas em repouso por 16 horas. Então, as amostras foram centrifugadas na centrífuga (NT 820, Novatecnica, Piracicaba, SP, Brasil) a 2500 RPM (equivalente a 1300 g) por cinco minutos, além do tempo de aceleração de 60 segundos e do tempo de frenagem de 120 segundos. Após centrifugadas, o conteúdo sobrenadante dos tubos foi acondicionado em potes plásticos e guardado em geladeira. O teor de K no extrato foi determinado em espectrofotômetro de emissão de chama. Repetiu-se a extração com Mehlich-1 sucessivamente até que o teor de K extraído tornou-se constante e próximo de zero, o que neste estudo, ocorreu na sétima extração. No software SAS ajustou-se uma equação de cinética de primeira ordem (Equação 1), como segue:

$$K_{\text{dessorvido}} = \beta - (\beta - \alpha) * 2,7182^{(-k*t)}$$

Equação 1

onde β é o teor de K potencialmente disponível ou dessorção máxima, α é o teor de potássio prontamente disponível ou a quantidade de potássio dessorvido na primeira extração, k é a taxa de dessorção constante e t é o tempo em horas.

Os efeitos das intensidades de pastejo, das camadas de solo e dos anos nos parâmetros α , β e k foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e quando os efeitos dos tratamentos foram significativos ($p < 0,05$) as médias dos tratamentos foram comparadas pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). O modelo estatístico utilizado para a ANOVA é apresentado na Equação 2:

$$Y_{ijkl} = \mu + B_i + P_j + \text{Erro a (ij)} + C_k + P_j C_k + \text{Erro b (ijk)} + A_l + P_j A_l + C_k A_l + P_j C_k A_l + \text{Erro c (ijkl)}$$

Equação 2

onde: μ = média geral do experimento; B_i = efeito de bloco ($i = 1, 2$ e 3); P_j = intensidade de pastejo ($j = 1, 2$ e 3); C_k = camada de solo ($k = 1, 2, 3$ e 4); A_l = anos ($l = 1, 2, 3$ e 4) e erro experimental.

5.4. Potássio não disponível e total

O teor de K total do solo foi determinado para as amostras de solo coletadas no ano de 2001 e no ano de 2017. Para preparo da amostra pesou-se 10 gramas de solo e este foi colocado em uma cápsula-forma, para preparo da pastilha de solo em Prensa Manual – 25 t da Marca Fluxana. Após realizado o molde da amostra, o teor de K total foi determinado por análise de fluorescência de raio-X. As análises foram realizadas no equipamento S2 Ranger da Bruker. Para obtenção da análise química semi-quantitativa, o espectro gerado a partir da amostra foi avaliado pelo *software Spectra EDX*.

Nesse trabalho, o teor de K não disponível foi considerado como a diferença entre o teor de K total e de K potencialmente disponível estimado pela dessorção de K. Assim, para calcular o teor de K não disponível foi utilizada a Equação 3:

$$K \text{ não disponível} = K \text{ total} - K \text{ potencialmente disponível} \quad \text{Equação 3}$$

Foi realizada análise de variância (ANOVA) para determinar o efeito das intensidades de pastejo, das camadas de solo e dos anos no teor de K total e de K não disponível do solo, quando os efeitos dos tratamentos foram significativos ($p < 0,05$) as médias dos tratamentos foram comparadas pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). O modelo estatístico utilizado para a ANOVA é apresentado na Equação 4:

$$Y_{ijk} = \mu + B_i + P_j + \text{Erro a (ij)} + C_k + P_j C_k + \text{Erro b (ijk)} + A_l + P_j A_l + C_k A_l + P_j C_k A_l + \text{Erro c (ijkl)} \quad \text{Equação 4}$$

onde: μ = média geral do experimento; B_i = efeito de bloco ($i = 1, 2$ e 3); P_j = intensidade de pastejo ($j = 1, 2$ e 3); C_k = camada de solo ($k = 1, 2, 3$ e 4); A_l = anos ($l = 1$ e 2) e erro experimental.

5.5. Balanço de potássio

Foi realizado balanço de K para as seguintes formas de potássio: K prontamente disponível (variável α), K potencialmente disponível (variável β), K não disponível (K total – K potencialmente disponível) e K total. Para cálculo do balanço das diferentes formas de K, foram quantificadas todas as entradas deste nutriente via fertilizante ao longo dos 17 anos de condução do experimento, bem como, todas as saídas produtivas deste nutriente, via exportação por grãos (soja) e carne bovina. A exportação de K pelos grãos de soja foi calculada a partir de valores médios descritos por Vargas (2014) (18,4 kg K Mg⁻¹ de grão de soja produzido). A quantidade de K exportado pela carne foi calculada com base em valores descritos por Williams (2007), sendo de 3.440 mg de K kg⁻¹ de carne produzida. Para cálculo do balanço de K utilizou-se a Equação 5:

$$Bt = (Kf - Ki) - [Kfr - (Kg + Kc)] \quad \text{Equação 5}$$

onde: Bt = balanço total de nutriente do solo; Kf = teor de K final (referente a última coleta, realizada no ano de 2017); Ki = teor de K inicial (referente a primeira coleta, realizada no ano de 2001); Kfr = quantidade de K adicionada ao solo via fertilização; Kg = quantidade de K exportada nos grãos; Kc = quantidade de K exportado na carne.

Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e quando os efeitos dos tratamentos foram significativos ($p < 0,05$) as médias dos tratamentos foram comparadas pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). O modelo estatístico utilizado para a ANOVA é apresentado na Equação 6:

$$Y_{ij} = \mu + B_i + P_j + \text{Erro residual} \quad \text{Equação 6}$$

onde: μ = média geral do experimento; B_i = efeito de bloco ($i = 1, 2$ e 3); P_j = intensidade de pastejo ($j = 1, 2$ e 3) e erro experimental.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1. Formas de potássio

A interação entre a intensidade de pastejo e o ano afetou todas as formas de K avaliadas neste estudo, bem como o teor de K total do solo (Tabela 4). Somente as variáveis α , β e k tiveram interação dupla entre o pastejo de inverno e a camada de solo, e a camada de solo e o ano de avaliação (Tabela 4). Somente a forma de K prontamente disponível foi afetada pela interação tripla entre a intensidade de pastejo, a camada de solo e o ano (Tabela 4).

Tabela 4. Significância dos fatores de variação e suas interações com as formas de potássio no solo devido a análise de variância (ANOVA)

Variável	I ⁽¹⁾	C ⁽²⁾	A ⁽³⁾	I x C	I x A	C x A	I x C x A
α	***	***	ns	**	***	***	*
β	**	***	ns	**	***	***	ns
k	**	***	***	**	***	***	ns
K estrutural	**	ns	ns	ns	*	ns	ns
K total	*	ns	ns	ns	**	ns	ns

⁽¹⁾ Intensidade de pastejo; ⁽²⁾ Camada de solo; ⁽³⁾ Ano. * Significativo em $P < 0,05$; ** Significativo em $P < 0,01$; *** Significativo em $P < 0,001$; ns = não significativo.

No ano de instalação do experimento (2001), não houve variação no teor de K prontamente disponível entre os tratamentos e as camadas de solo (Figura 3a). A partir da segunda avaliação (2007) realizada, o tratamento SP passou a se

diferenciar dos tratamentos pastejados na camada superficial do solo (0-5 cm) (Figura 3b), sendo superior ao PM e ao PI e alcançando o teor de 512 mg dm^{-3} de K prontamente disponível 17 anos após o início do experimento. Além disso, para este mesmo tratamento, a partir do ano de 2007 até a última avaliação realizada no experimento, ocorreu um gradiente decrescente de K prontamente disponível a partir da superfície do solo ao longo das camadas do perfil do solo avaliadas (Figura 3b). Este gradiente decrescente de K na forma prontamente disponível também veio a ocorrer nos tratamentos com PM e com PI na terceira (Figura 3c) e na quarta avaliações (Figura 3d), respectivamente.

Na média de todos os anos avaliados, o teor de K na forma potencialmente disponível (β) foi superior na camada superficial do solo, gerando, também, um gradiente decrescente no perfil do solo, a partir da camada mais superficial (0-5 cm), em todos os tratamentos avaliados (Figura 4). A área experimental encontra-se em sistema plantio direto desde o ano de 1993. Assim, todas as adições de fertilizantes ocorrem na camada mais superficial do solo (0-5 cm), bem como a ciclagem de nutrientes, que faz com que estes sejam sempre depositados na camada mais superficial do solo, tanto via excreta animal quanto pela decomposição de resíduos dos cultivos. Assim como verificado por Ferreira et al. (2009) e Calegari et al. (2013), a maior concentração de K na camada mais superficial do solo, bem como a diminuição abrupta da disponibilidade desse nutriente em profundidade ocorre devido à ciclagem via decomposição das culturas de cobertura, além de ser uma característica do sistema plantio direto, pois neste sistema a fertilização é limitada à camada superficial do solo (Tiecher et al., 2017). A maior CTC na camada superficial do solo (0-5 cm) proveniente do acúmulo da matéria orgânica (MO), resultado do não revolvimento do solo, possibilita maiores sítios de ligação para o K na superfície do solo resultando em maiores teores do nutriente em superfície, e consequentemente menores perdas desse nutriente por lixiviação (Santos & Tomm, 1996; Santos et al., 2001). A aveia-preta destaca-se pela alta produção de biomassa (Tiecher et al., 2017), podendo ciclar e disponibilizar maiores quantidades de K prontamente disponível quanto maior for a sua densidade de plantas.

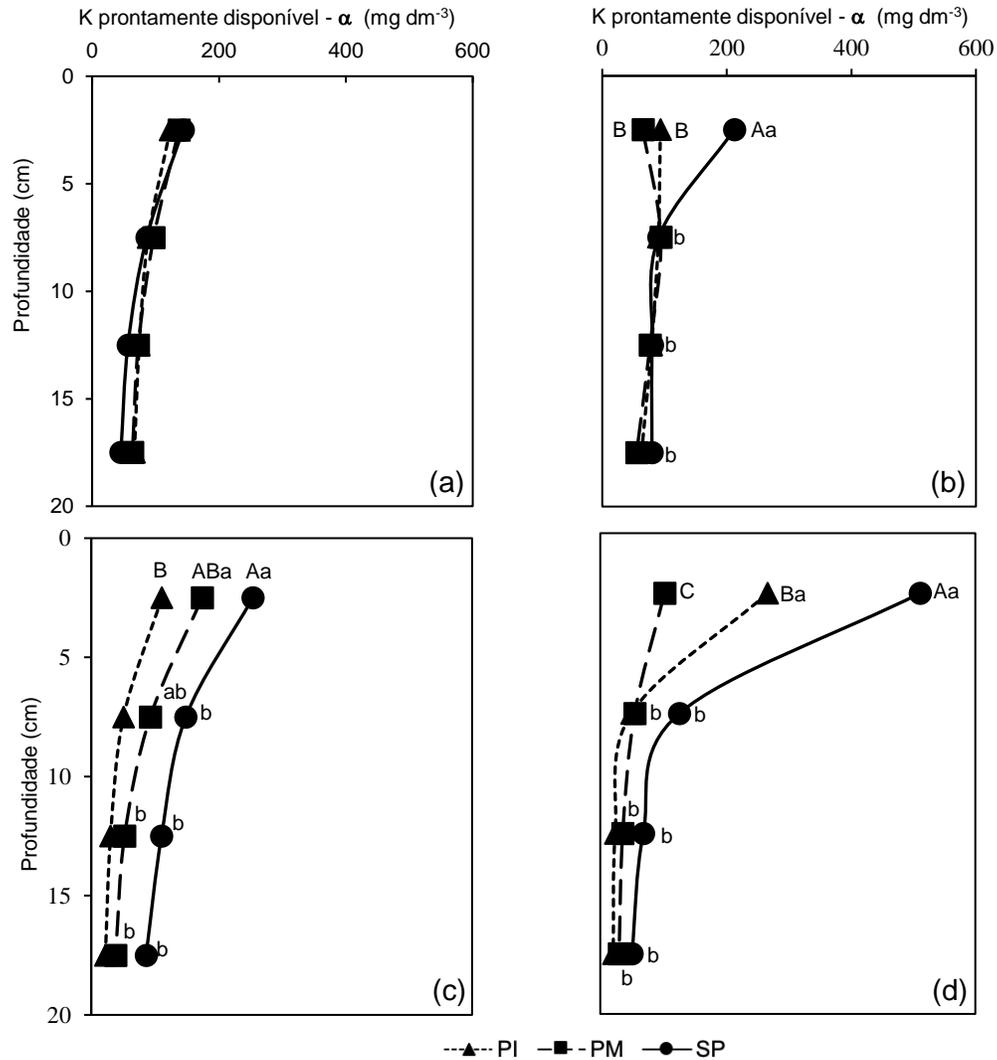


Figura 3. Influência do pastejo intensivo (PI), pastejo moderado (PM) e ausência de pastejo (SP) no teor de potássio prontamente disponível (α) em quatro camadas de solo em 2001 (a), 2007 (b), 2012 (c) e 2017 (d), em um sistema integrado de produção agropecuária (SIPA) sob plantio direto no sul do Brasil. As letras maiúsculas comparam com teste Tukey ($p < 0,05$) as intensidades de pastejo em cada camada de solo; letras minúsculas comparam as camadas de solo em cada tratamento.

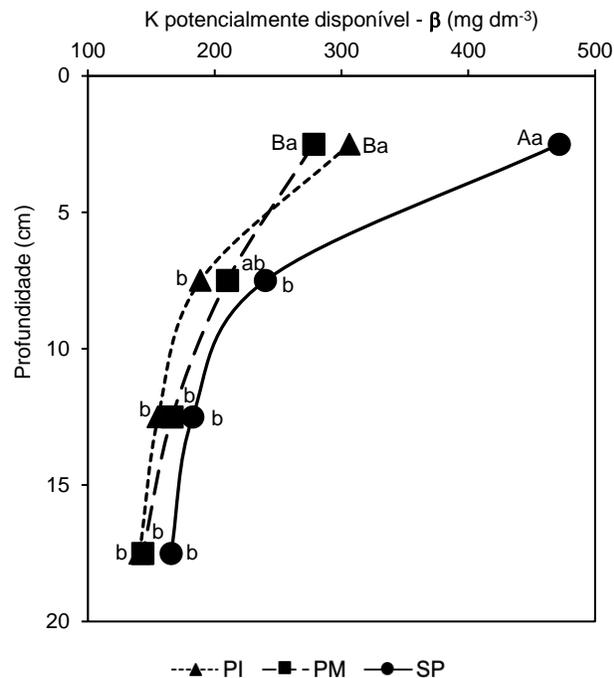


Figura 4. Influência do pastejo intensivo (PI), pastejo moderado (PM) e ausência de pastejo (SP) na média do teor de K potencialmente disponível (β) em quatro camadas de solo em um sistema integrado de produção agropecuária (SIPA) sob plantio direto no Sul do Brasil. Letras maiúsculas comparam com teste Tukey ($p < 0,05$) as intensidades de pastejo em cada camada de solo; as letras minúsculas comparam camadas de solo em cada intensidade de pastejo.

Até a segunda avaliação realizada no ano de 2007, não ocorreu diferença no teor de K prontamente disponível entre os tratamentos. A partir da terceira coleta, realizada no ano de 2012, o teor de K prontamente disponível foi maior no tratamento SP em relação aos tratamentos pastejados, chegando este tratamento a ter o dobro do teor de K prontamente disponível que os tratamentos pastejados no último ano de avaliação. Em ambos os tratamentos pastejados, o teor de K prontamente (Figura 5) e potencialmente disponível (Figura 7) mantiveram-se estáveis ao longo dos 17 anos de condução do experimento. As formas de K não disponíveis tamponam as formas de K mais facilmente disponíveis as plantas (Mielniczuk & Selbach, 1978; Bortoluzzi et al., 2005; Brunetto et al., 2005).

Em maio de 2017, no tratamento SP, na média de todas as camadas de solo (0-20 cm), o teor de K prontamente disponível (α) foi de 189 mg dm^{-3} , sendo

130% superior ao teor deste nutriente em 2001, de 82 mg dm^{-3} (Figura 5). No tratamento SP ocorreu um aumento linear de K na forma prontamente disponível ao longo dos anos avaliados, tendo ocorrido um aumento de mais de 30 mg dm^{-3} do nutriente nesta forma em cada avaliação realizada. No ano de 2001, o teor de K prontamente disponível do solo em todos os tratamentos avaliados estava na classe *Médio* (CQFS-RS/SC, 2016) na média da camada de 0-20 cm.

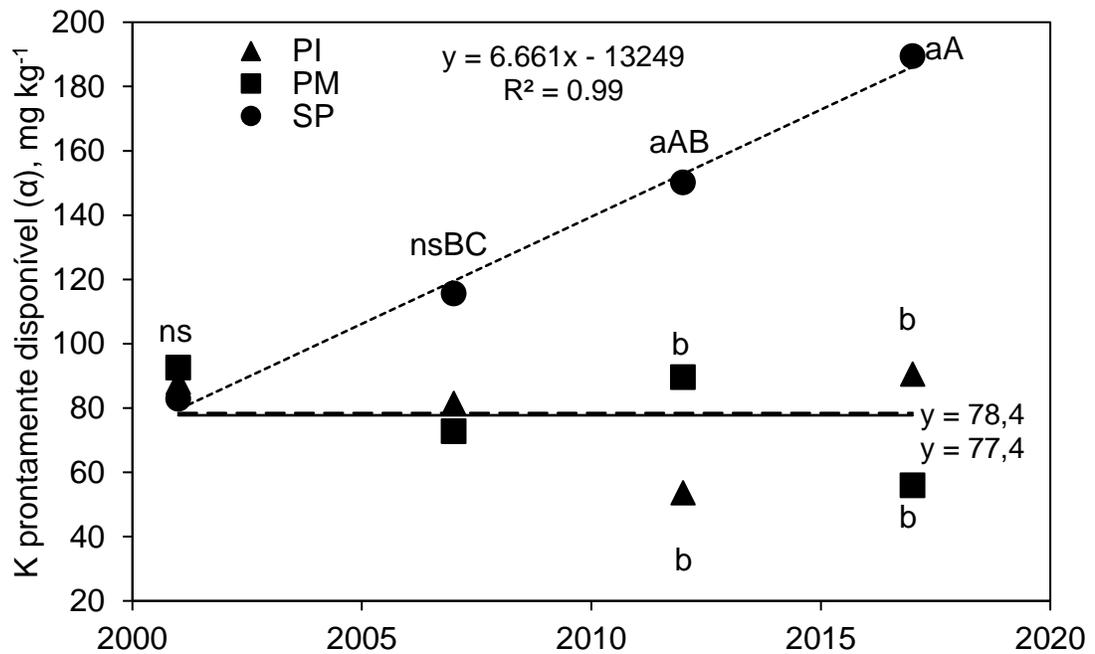


Figura 5. Teor de potássio (K) prontamente disponível (α) médio na camada de 0-20 cm, nos tratamentos com pastejo intensivo (PI), pastejo moderado (PM) e ausência de pastejo (SP), ao longo de 17 anos de condução de um sistema integrado de produção agropecuária (SIPA) em sistema plantio direto no Sul do Brasil. Letras maiúsculas comparam teste Tukey $p < 0,05$ os anos em cada intensidade de pastejo; as letras minúsculas comparam as intensidades de pastejo em cada ano avaliado.

A variável beta (β), que representa o teor de K potencialmente disponível apresentou comportamento semelhante ao da variável α no tratamento SP (Figura 7). Assim, até o sétimo ano de avaliação o teor de K potencialmente disponível não diferiu entre os tratamentos. Na terceira avaliação, o teor de K correspondente a variável β no tratamento SP foi superior em relação ao tratamento com intensidade

de pastejo intensivo e não diferiu do tratamento com intensidade de pastejo moderado (Figura 7). O teor de K potencialmente disponível aumentou ao longo dos anos no tratamento SP, sendo maior que ambos os tratamentos pastejados 17 anos após a instalação do experimento (2017) (Figura 7). Dentre todos os tratamentos avaliados, o tratamento SP possui maior quantidade de resíduos de parte aérea da pastagem ao final do período hibernar (Assmann et al., 2014), o que contribui para maior retorno de K ao sistema via senescência das plantas (Ferreira et al., 2011) e também para redução de impactos negativos ao solo, como perdas de solo e nutrientes por escoamento superficial (Pittelkow et al., 2014). A maior cobertura do solo pela palhada da aveia preta nas áreas sem pastejo diminui a ocorrência de erosão do solo, e contribui para a ciclagem de nutrientes via senescência das plantas (Bortoluzzi et al., 2013), consequentemente reduz as perdas de K por escoamento superficial. E a ausência do animal nas áreas sem pastejo reduz as perdas de K por lixiviação.

Nas amostras de solo coletadas no ano de 2017, último ano de avaliação, os teores de K acumulados nos tratamentos SP, PM e PI pelas sucessivas extrações foram de 306; 156; e 185 mg dm⁻³ (Figura 6), respectivamente, sendo que, na primeira extração realizada foi extraído 62, 37 e 50% desses valores para os tratamentos SP, PM e PI respectivamente. Supõe-se que o restante de K extraído a partir da segunda extração subsequente seja proveniente da fração denominada “não-trocável”, ou “potencialmente disponível”. Inferindo que o valor acumulado nas extrações sucessivas simulasse a absorção de K pela planta, pode-se dizer que cerca de 50% do total absorvido pela planta não é verificado nas análises de rotina, que utilizam uma única extração com o extrator Mehlich-1 para determinar o teor de K presente na amostra de solo. A disponibilidade de K avaliada por extratores químicos em análises de rotina deve ser correlacionada com as quantidades deste nutriente extraída pelas plantas. No entanto, estes métodos subestimam a capacidade de suprimento de K pelo solo, pois o K prontamente disponível é tamponado por outras formas deste nutriente presentes no solo.

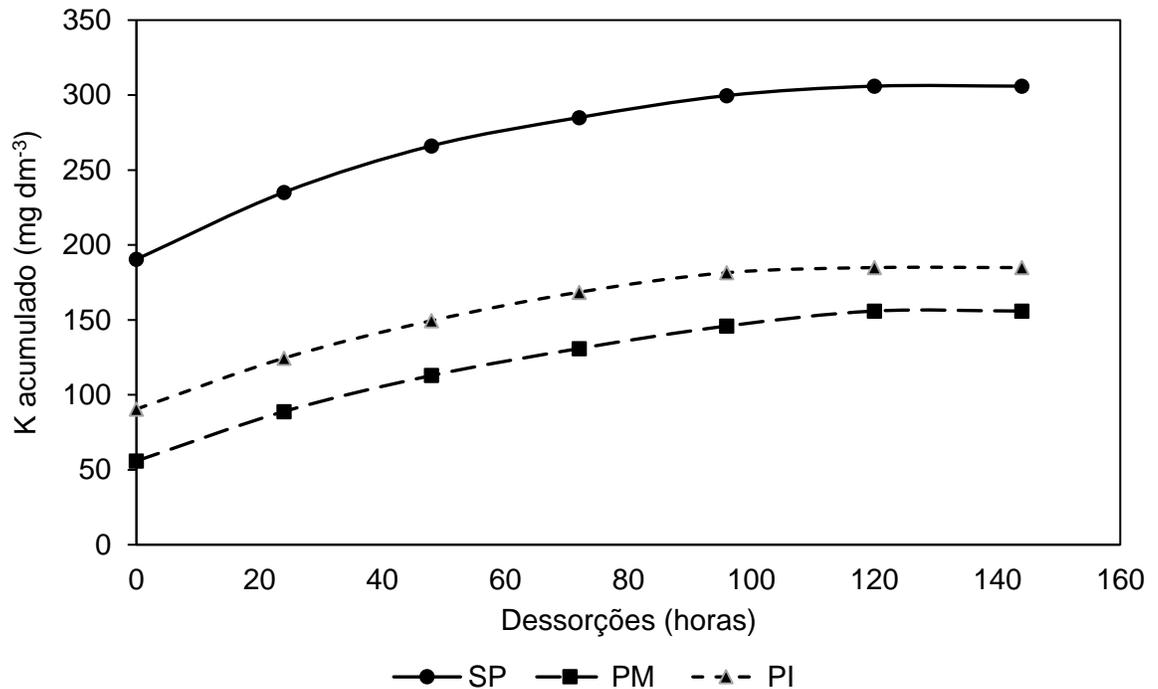


Figura 6. Cinética de liberação de potássio (K) por extrações sucessivas, na média da camada de 0-20 cm, nos tratamentos com pastejo intensivo (PI), pastejo moderado (PM) e ausência de pastejo (SP), em um Latossolo Vermelho Distroférrico típico, conduzido há 17 anos sob SIPA com diferentes intensidades de pastejo.

Vários estudos mostram a importância das plantas de cobertura atuando como pastagem em sistemas agropecuários, visto que além de protegerem o solo da erosão também atuam na ciclagem e no aumento dos teores de K em formas potencialmente disponíveis para as plantas no solo (Derpsch et al., 1985; Correa & Reichardt, 1995; Santos et al., 2003; Garcia et al., 2008; Ferreira et al., 2011). Além disso, apesar de após a senescência das plantas o K ser facilmente removido do tecido vegetal pela água da chuva, por ele não estar associado a nenhum componente estrutural do tecido vegetal (Marschner, 1995; Taiz e Zeiger, 2004) e ocorrer de forma livre no tecido das plantas (Klepker & Anghinoni, 1996; Marschner, 1995), a liberação de nutrientes presentes no resíduo da pastagem é mais lenta em relação a da excreta animal (Dubeux Jr. et al., 2007), podendo levar cerca de 15 a 30 dias (Pacheco et al., 2011), dependendo da quantidade de chuva após a morte

dos tecidos (Benites et al., 2010), o que possibilita maiores chances de adsorção deste nutriente no solo.

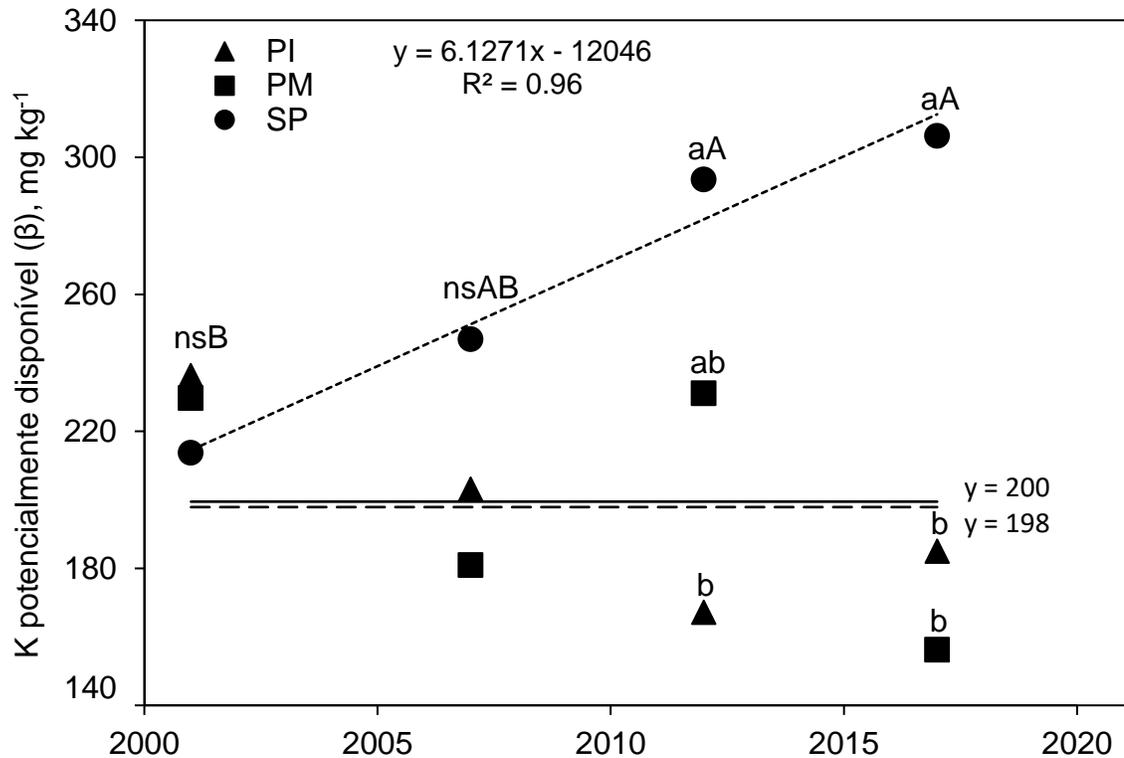


Figura 7. Teor de potássio (K) potencialmente disponível (β) médio na camada 0-20 cm, nos tratamentos com pastejo intensivo (PI), pastejo moderado (PM) e ausência de pastejo (SP), ao longo de 17 anos de condução de um sistema integrado de produção agropecuária (SIPA) no Sul do Brasil. Letras maiúsculas comparam com teste Tukey ($p < 0,05$) anos em cada intensidade de pastejo; letras minúsculas comparam (teste Tukey $p < 0,05$) as intensidades de pastejo em cada ano avaliado.

Após um ano, o teor de K potencialmente disponível foi de 230 e 236 mg dm^{-3} nos tratamentos com PM e PI, respectivamente. Na última avaliação realizada (maio de 2017), os tratamentos com PM e PI apresentaram uma redução de 73 e 51 mg dm^{-3} de K na forma potencialmente disponível, respectivamente (Figura 7). Isso mostra que, embora ainda não tenha ocorrido diferença significativa está ocorrendo uma diminuição no teor de K potencialmente disponível ao longo dos anos nos tratamentos pastejados. Pelo pastejo, o animal absorve o nutriente presente na pastagem, em se tratando do K, apenas uma pequena parte do

nutriente absorvido via pastejo é retido no organismo do animal e a maior parte do K retorna ao solo. Estima-se que num sistema com cerca de três bovinos por hectare, caracterizando um pastejo intensivo, $230 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de K retorne à superfície do solo pela urina (Hutton et al, 1967; Hogg, 1981). No entanto, apesar dessa alta quantidade de K retornando ao solo, ela não ocorre de forma homogênea. Os animais distribuem suas excretas de forma heterogênea sobre a área de pastejo (Ledgard, 2001). Conseqüentemente, ocorre menor concentração de K em determinadas áreas e já nas áreas onde os animais permanecem mais tempo, como próximo a bebedouros, porteiras e cochos de sal, ocorre acúmulo do nutriente (Martens & Entz, 2011). Dessa forma, ocorre que possivelmente o solo não é eficiente em adsorver a alta concentração de K que é adicionada pela micção de uma só vez nesses locais isolados e, mesmo com a presença de plantas, essas não são capazes de reciclar o montante de K ali depositado. Conseqüentemente, parte deste nutriente pode ser perdido por lixiviação e também por escoamento superficial (Hogg, 1981; Lustosa, 1998; Ferreira et al., 2009). Apesar de os tratamentos pastejados também ciclarem K via senescência das plantas, liberando quantidades significativas de K na superfície do solo, mesmo que em menor quantidade quando comparados ao tratamento SP devido a quantidade de resíduos, essa deposição não evita a dessorção de K de formas não-disponíveis (Bortoluzzi et al., 2005), devido ao gradiente de K criado pela alta absorção deste nutriente pela soja, forçando a sua liberação. Dessa forma, pode-se dizer que o pastejo intensivo não é eficiente em combinar a produção de carne com a preservação do solo, aumentando a eficiência de uso do K no solo, bem como dos demais macronutrientes (Martins et al., 2014).

Sabe-se que o solo com seus nutrientes está em constante equilíbrio, porém quanto mais fortemente retido o K estiver aos minerais do solo e/ou principalmente dependendo a forma que este elemento se encontra no solo, mais ou menos lenta será a sua velocidade de depleção. Assim, quando a planta absorve o K da solução do solo, esse rapidamente é suprido pelo K na forma prontamente disponível e, além disso, o K que está na forma potencialmente disponível também poderá suprir num período de tempo relativamente curto o nutriente que está na forma prontamente disponível (Gommers et al., 2005). No entanto, a intensidade com que

o K que está na forma não disponível sofre depleção, a fim de que supra as formas mais disponíveis de K para, posteriormente, ser absorvido pelas plantas, é bem menor, não acompanhando essa velocidade de suprimento de nutriente que seria necessária para que o teor de K nas formas que a planta alcança se mantenha estável. Além disso, essa depleção se acentua quando os teores de K prontamente ou potencialmente disponível no solo são mais baixos (Kaminski et al., 2007).

Como observado por Assmann et al. (2014), na média de 10 anos de avaliação do mesmo experimento, as diferentes intensidades de pastejo resultaram em diferentes quantidades de resíduo ao final do período hibernar. A maior intensidade de pastejo (PI) apresentou menor quantidade de resíduo da pastagem, conseqüentemente resultando em menor adição de C ao solo e, à medida que diminuiu a intensidade de pastejo, a quantidade de resíduos que permaneceu na superfície do solo ao término do ciclo de pastejo foi maior. A Figura 8 mostra a relação entre o teor de K potencialmente disponível e a quantidade de resíduos da pastagem. Os tratamentos pastejados apresentaram quantidade média de resíduo da pastagem de 1,4 e 2,9 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ para os tratamentos com PI e PM, respectivamente, e tiveram teor médio de K potencialmente disponível de 181 e 214 mg dm⁻³ para os tratamentos com PI e PM, respectivamente. Ambos os tratamentos pastejados tiveram o valor de β abaixo do teor médio de K potencialmente disponível do tratamento SP, que foi de 265 mg dm⁻³, com média de 7,1 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ de resíduo da pastagem. A Figura 8 corrobora que as plantas atuam na ciclagem absorvendo o K do solo e novamente disponibilizando este nutriente no sistema. Pacheco et al. (2011) observaram, em estudo realizado no Cerrado, ótima eficiência de plantas de cobertura na ciclagem de nutrientes, acumulando em sua matéria seca 58 e 53 kg ha⁻¹ (safra 2009 e 2010) de K que vão retornar ao solo após a senescência e decomposição dos resíduos. A aveia, uma das culturas utilizadas no experimento no período hibernar, é uma espécie com alta capacidade de acumular K, concentrando grandes quantidades deste nutriente na sua parte aérea, que virá a ser disponibilizado na camada superficial do solo para a cultura de verão subsequente (Giacomini et al., 2003), principalmente pelo K ser um dos nutrientes que apresenta maiores taxas de acúmulo na matéria seca de plantas de cobertura (Boer et al., 2007; Torres et al., 2008). Dessa forma, é importante que, em áreas

onde há a presença do animal, faça-se um manejo adequado da altura do pasto, mantendo-se uma boa cobertura vegetal. Assim, além de se otimizar o uso da área introduzindo o animal no período hibernar, as plantas atuarão como recicladoras de K disponibilizando este nutriente de forma homogênea para a cultura de verão que virá em sucessão. A quantidade de K a ser liberado na superfície do solo está diretamente relacionada com a deposição dos restos culturais na camada superficial, sendo tão significativa quanto for a quantidade de resíduos para disponibilizar o K (Figura 8).

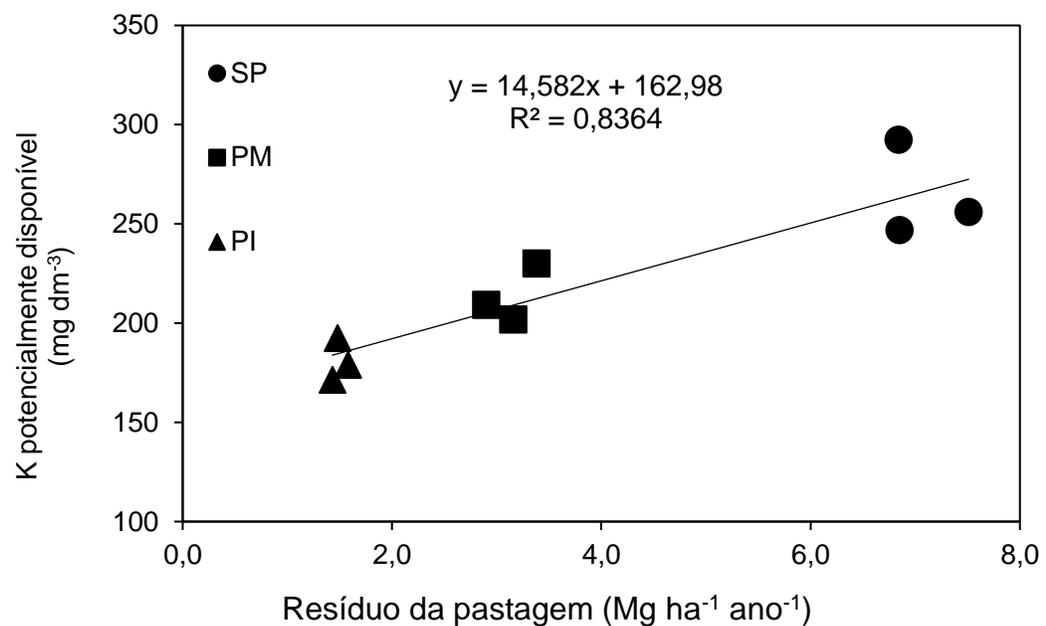


Figura 8. Relação entre o resíduo da parte aérea da pastagem e o teor de K potencialmente disponível na média da camada de solo de 0 a 20 cm, após 12 anos (2013) de condução de um sistema integrado de produção agropecuária em plantio direto com diferentes intensidades de pastejo. (adaptado de Assmann et al., 2014).

Na camada mais superficial do solo (0-5 cm) os valores da taxa de dessorção constante (k) foram superiores às demais camadas de solo em todos os tratamentos (Figura 9), corroborando o que foi apresentado na Figura 4, em que a quantidade de K dessorvida foi superior na camada superficial do solo em relação as demais camadas avaliadas. O tratamento SP apresentou menor energia de

ligação que os tratamentos pastejados, também corroborando a Figura 4, que mostra que no tratamento SP houve maior extração de K.

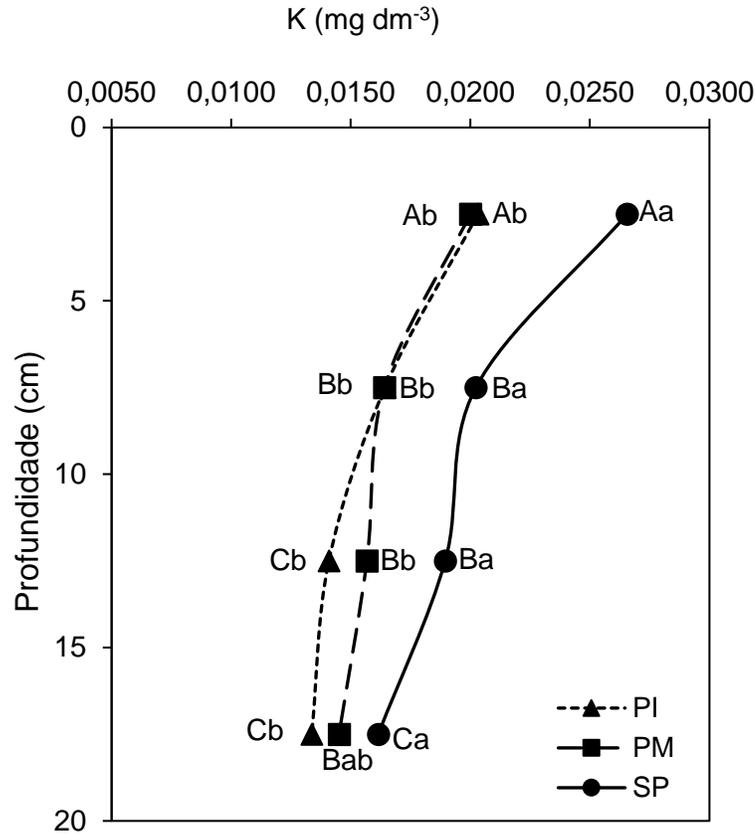


Figura 9. Taxa de dessorção constante do potássio em quatro camadas de solo (0-5, 5-10, 10-15 e 15-20), em diferentes intensidades de pastejo em um sistema integrado de produção agropecuária em plantio direto no Sul do Brasil. Letras maiúsculas comparam pelo teste Tukey ($p < 0,05$) as camadas de solo em cada tratamento; letras minúsculas comparam pelo teste Tukey ($p < 0,05$) as intensidades de pastejo em cada camada de solo.

Após 17 anos da implantação do experimento, o K na forma não disponível foi responsável por 92, 96 e 95% do total de K presente no solo na média das camadas de 0-20 cm dos tratamentos SP, PM e PI, respectivamente. Isso corrobora o estudo de Melo et al. (1995), que observou que a média do teor de K não disponível corresponde a 96% do teor total de K nos solos. Assim como para as demais formas de K avaliadas, o K não disponível no tratamento SP aumentou após 17 anos do início do experimento (Figura 10a). Devido a saturação de K no solo nas formas prontamente e potencialmente disponíveis, pode ocorrer a fixação deste nutriente em formas mais dificilmente disponíveis. Consequentemente, como reflexo do que ocorreu para todas as formas do nutriente avaliadas, a análise de K

total mostrou um aumento de cerca de 500 mg dm^{-3} de K no solo no tratamento SP na última avaliação realizada após 17 anos da implantação do experimento (Figura 10b). Este tratamento, que inicialmente apresentou teor de K total menor que os tratamentos pastejados, não diferiu dos tratamentos com PM e PI na última avaliação realizada. Se após cada cultivo, o tratamento SP resultar em um saldo de K, pode ocorrer pela fase mineral do solo o processo de adsorção específica de K. No entanto, este processo seria limitado à presença de minerais no solo cuja estrutura garante o recebimento de K (Bortoluzzi et al., 2005). Mesmo em solos altamente intemperizados, fator este determinado pelo regime de chuvas e temperatura, pode haver a presença em quantidades não desprezíveis de argilominerais 2:1 (Bortoluzzi et al., 2008). Porém, apesar de haver fertilização do solo, a proporção de argilominerais que contém K pode ser reduzida em função da fase vermiculita com hidróxi-Al entrecamadas (Bortoluzzi et al., 2005). Bertolazi et al. (2017), em estudo realizado na mesma área experimental do presente estudo, encontraram a presença de maiores quantidades de argilominerais 2:1 com hidróxi-Al entrecamada no tratamento PI, quando comparado ao SP. Os autores afirmam que a presença do animal na área com PI pode ter tido grande contribuição para esse resultado, devido à maior disponibilidade do nutriente proveniente do retorno via dejetos dos animais. Porém, o presente estudo mostra que apesar da redistribuição de K nas áreas pastejadas, boa parte deste nutriente pode estar sendo perdido, provavelmente por lixiviação e escoamento superficial.

Já para os tratamentos pastejados, ocorreu uma leve redução no teor de K não disponível, refletindo também no teor de K total que diminuiu 202 e 131 mg dm^{-3} nos tratamentos com PI e PM, respectivamente (Figura 10b). Apesar de vários anos de cultivo, o K não disponível, que contribui com quase todo o valor de K total do solo, é pouco acessível às plantas (Kaminski et al., 2007). Embora a quantidade de K que reduziu nos tratamentos pastejados pareça pequena perto da quantidade total deste nutriente presente no solo, no tratamento com PI a redução no teor de K foi maior que a quantidade de K potencialmente disponível neste tratamento após 17 anos de condução do experimento. E no tratamento com PM essa redução quase alcançou a quantidade na forma potencialmente disponível do K. Apesar da prática de fertilização com K, os 17 anos de cultivo com alta exportação de K nos grãos de

soja, bem como, com perdas deste nutriente, resultou em depleção de K na forma estrutural, consequentemente refletindo em redução no teor de K total do solo. Esse resultado corrobora o estudo de Bortoluzzi et al. (2012), onde os autores concluíram que, mesmo com aplicação de fertilizante potássico, o cultivo de uva por longo período de tempo promoveu alteração na mineralogia do solo, transformando illita em vermiculita devido à perda de K da entrecamada.

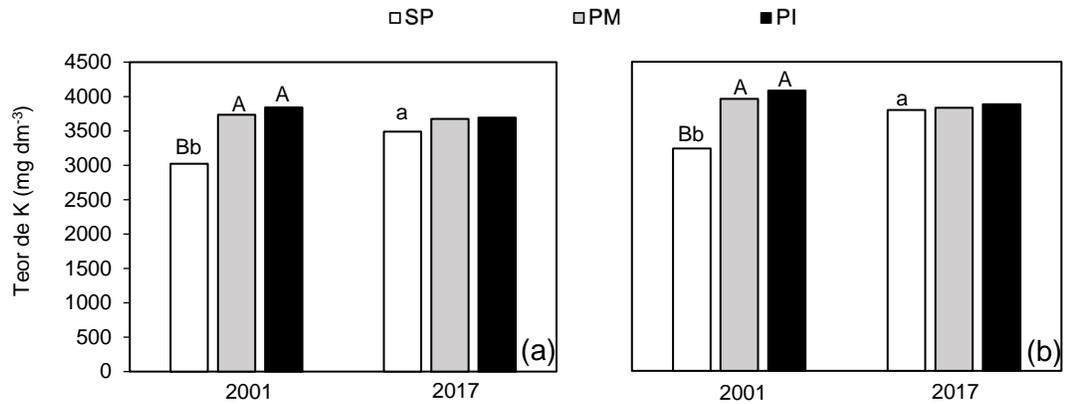


Figura 10. Teores de K não disponível (a) e total (b) na média de quatro camadas (0-5, 5-10, 10-15 e 15-20) do solo no início e após 17 anos de instalação de um sistema integrado de produção agropecuária em plantio direto com diferentes intensidades de pastejo no Sul do Brasil. Letras maiúsculas comparam com teste Tukey ($p < 0,05$) intensidades de pastejo em cada ano; letras minúsculas comparam com teste Tukey ($p < 0,05$) os anos para cada intensidade de pastejo.

6.2. Balanço de potássio

A quantidade de K adicionada ao solo via fertilização foi igual para os três tratamentos. No entanto, após 17 anos de manejo do experimento com soja no verão e bovinos de corte em pastagem de aveia-preta e azevém no inverno, as intensidades de pastejo resultaram em saídas diferentes.

Ao longo de 17 anos de condução do experimento, foram adicionados 875 kg de K via fertilização do solo (Tabela 5). Foram exportados via grãos 111, 105 e 105% do total de fertilizante potássico adicionado ao solo nos tratamentos SP, PM e PI, respectivamente. A quantidade de K exportada via grãos é superior a quantidade deste nutriente adicionada ao solo, ou seja, a reserva de K do solo possivelmente está sendo esgotada. Priorizando uma agricultura sustentável, às doses de fertilizantes adicionados deve ser no mínimo suficiente para repor os

nutrientes exportados (Cunha et al., 2010). Foram produzidos 7146,7 e 8326 kg PV ha nos tratamentos com PM e PI, respectivamente. A exportação deste nutriente na carne, em ambos os tratamentos pastejados, soma 1%. Tendo sido exportado ao longo de 17 anos, 12 e 14 kg de K via carne nos tratamentos com PM e PI, respectivamente.

Tabela 5. Balanço total das formas de K prontamente disponível, potencialmente disponível, estrutural e total na camada de 0 a 20 cm do solo aos 17 anos de adoção de um sistema de integração soja-bovinos de corte sob diferentes intensidades de pastejo

Variável (kg ha ⁻¹ de K)	Sem pastejo	Pastejo moderado ⁽¹⁾	Pastejo intenso ⁽²⁾
<u>Entrada</u>			
Fertilizante	875	875	875
<u>Saídas</u>			
Grão de soja	969,7	921,4	921,7
Carne bovina	-	12,2	14,2
<u>Estoque de K prontamente disponível no solo (α)</u>			
Novembro de 2001	82,2	92,2	88
Maio de 2017	190,4	57,8	92,1
Balanço final K (α)	202,8	24,2	65
<u>Estoque de K potencialmente disponível no solo (β)</u>			
Novembro de 2001	213,7	229,6	236,3
Maio de 2017	306,3	156,2	185,1
Balanço final K (β)	103,9	-98,1	-73,6
<u>Estoque de K estrutural no solo</u>			
Novembro de 2001	3022,5	3732,6	3843,5
Maio de 2017	3490	3674,6	3694,2
Balanço final K estrutural	478,8	-82,7	-171,7
<u>Estoque de K total no solo</u>			
Novembro de 2001	3236,2	3962,2	4079,8
Maio de 2017	3796,3	3830,8	3879,2
Balanço final K total	571,4	-156,1	-222,9

⁽¹⁾ Altura de manejo do pasto de 20 cm; ⁽²⁾ Altura do manejo do pasto de 10 cm.

Com exceção da forma prontamente disponível, todas as demais formas de K avaliadas resultaram em balanço final negativo para os tratamentos com a presença do animal em pastejo. Conseqüentemente, o balanço de K total também foi negativo para estes tratamentos, enquanto que o tratamento SP apresentou balanço de K positivo para todas as formas deste elemento e também para o seu teor total no solo (Figura 11). Altas adições de K durante longos períodos no campo preservam as reservas de K de formas potencialmente ou lentamente disponíveis, esta é uma reserva que embora não detectada em análises de rotina, está disponível para as plantas (Moterle et al., 2016). Altas adições de K via fertilização do solo também diminuem o esgotamento de K presente na entrecamada e na estrutura de minerais (Welch & Scott, 1961). Como pode ser visto na Tabela 5, a quantidade de K adicionado ao solo via fertilização tem sido menor do que o exportado via grãos de soja. Assim, nos tratamentos com PM e PI, aonde as perdas deste nutriente são potencializadas via urina do animal, está ocorrendo redução do K presente no solo em formas potencialmente disponível e até mesmo na forma dificilmente disponível, a fim de suprir a forma prontamente disponível que está sendo absorvida pelas plantas. Como não ocorreram altas adições de K, de forma que resultasse em um “saldo” de K no solo proveniente das adições via fertilização, é provável que não esteja ocorrendo a preservação das reservas deste nutriente no solo. Tampouco ocorre redução do esgotamento do K presente em formas mais dificilmente disponíveis e estruturais. Devido à absorção do nutriente pelas plantas, e as perdas de K nos tratamentos pastejados, formas mais dificilmente disponíveis acabam precisando suprir as formas do nutriente que estão sendo retiradas do sistema. Como consequência, alterações no sentido da intemperização das reservas minerais, fonte deste nutriente, podem ocorrer. Além disso, se tal situação for mantida por longo período, pode ocasionar a diminuição do teor de K das formas mais dificilmente disponíveis no solo, vindo a comprometer a reposição deste nutriente para as formas mais disponíveis até alcançar a solução do solo, causando então prejuízo para as culturas (Bortoluzzi et al., 2005). Isso pode ser visto claramente na Figura 11, que, além de mostrar um balanço de K negativo nas formas potencialmente disponível, dificilmente disponível e total nos tratamentos

com PM e PI, também mostra que nas áreas sem pastejo o balanço de K no solo é positivo.

O K correspondente às variáveis α e β tem um pequeno saldo positivo nas áreas SP, pois estas são as formas do nutriente que a planta alcança e consegue extrair mais facilmente, absorvendo e exportando no grão quase toda a quantidade do nutriente presente nestas formas. No entanto, o K na forma dificilmente disponível, além de ter um grande saldo positivo no balanço (Figura 11) ainda está sendo aumentado ao longo de 17 anos de manejo do experimento (Figura 10a). Devido a possível não ocorrência de perdas por lixiviação que resultassem em balanço negativo nesse tratamento, não ocorreu também a necessidade de suprimento de K de formas mais dificilmente disponível, não causando redução nessa forma do nutriente no tratamento SP. Em estudo realizado em área de sistema integrado de produção de grãos e ovinos, Arnuti (2018), quando avaliou o balanço de K, verificou menores perdas não produtivas de K em tratamento com pastejo leve (PL) de ovinos (20% do peso vivo de oferta de forragem), em comparação ao tratamento com pastejo moderado (10% do peso vivo de oferta de forragem). Esse resultado é atribuído à cobertura vegetal, visto que no tratamento com PL o azevém é estabelecido via ressemeadura natural mais rapidamente e com distribuição mais homogênea em comparação ao estabelecimento da pastagem no tratamento com PM (Campos, 2015).

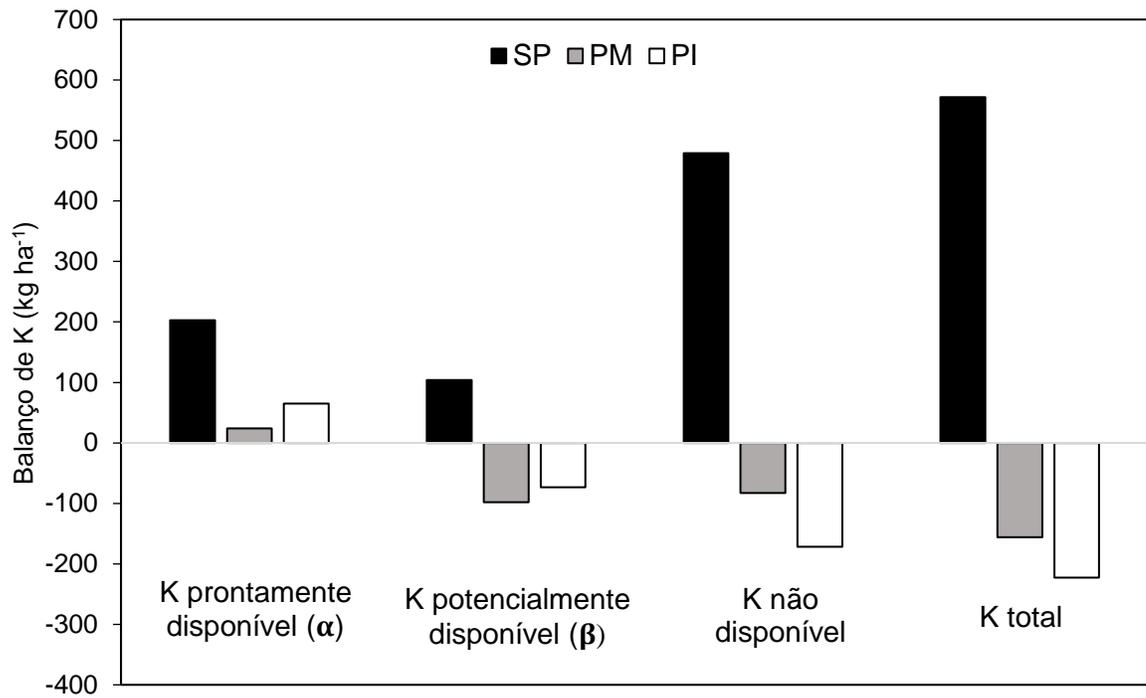


Figura 11. Balanço das formas de potássio prontamente disponível, potencialmente disponível, dificilmente disponível e total, na camada de 0 a 20 cm de solo de um sistema integrado de produção agropecuária com diferentes intensidades de pastejo no Sul do Brasil.

7. CONCLUSÕES

A ausência de pastejo bovino gerou aumento nos teores de K prontamente e potencialmente disponível, bem como de K não disponível e total no solo.

As diferentes intensidades de pastejo avaliadas não modificaram os teores de K em nenhuma das formas avaliadas ao longo de 17 anos de condução do experimento.

Com exceção do K na forma prontamente disponível, todas as demais formas do nutriente avaliadas resultaram em balanço de K negativo, possivelmente em função das perdas por lixiviação e escoamento superficial desse nutriente nos tratamentos pastejados. Diferentemente, a ausência de pastejo resultou em balanço de K positivo para todas as formas do nutriente e também para o seu teor total no solo.

REFERÊNCIAS

ANGHINONI, I.; CARVALHO, P.C.F.; COSTA, S.E.V.G.A. Abordagem sistêmica do solo em sistemas integrados de produção agrícola e pecuária no subtropical brasileiro. *In*: ARAÚJO, A.P.; ALVES, B.J.R. (ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2013. p. 325-373.

ANGHINONI, I. *et al.* Ciclagem de nutrientes em integração lavoura-pecuária. **Synergismus Scientifica**, Pato Branco, v.6, n.2, 2011. Trabalho apresentado no 3º Encontro de Integração Lavoura-Pecuária no Sul do Brasil, Pato Branco, 2011.

ARNUTI, F. **Ciclagem e balanço de nutrientes em sistema integrado de produção de grãos e ovinos**. 2018. 158 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

ASSMANN, J.M. *et al.* Soil carbon and nitrogen stocks and fractions in a long-term integrated crop-livestock system under no-tillage in Southern Brazil. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 190, p. 52-59, 2014.

BARBER, S.A. **Soil nutrient bioavailability: a mechanistic approach**. 2nd ed. New York: Wiley, 1995. 384 p.

BELL, L.W.; MOORE, A.D. Integrated crop-livestock systems in Australian agriculture: trends, drivers and implications. **Agricultural Systems**, Barking, v. 111, p. 1-12, 2012.

BENITES, V.M. *et al.* Potássio, cálcio e magnésio. *In*: PROCHNOW, L.I.; CASARIN, V.; STIPP, S.R. **Boas práticas para uso eficiente de fertilizante**. Piracicaba: IPNI, 2010. p. 133-204.

- BERTOLAZI, V.T. *et al.* Impact of an integrated no-till soybean-beef cattle production system on Oxisol mineralogy in Southern Brazil. **Applied Clay Science**, Amsterdam, v. 149, p. 67-74, 2017.
- BISSANI, C.A. *et al.* **Fertilidade dos solos e manejo da adubação de culturas**. 2. ed. Porto Alegre: Metrópole, 2008. 344p.
- BOER, C.A. *et al.* Ciclagem de nutrientes por plantas de cobertura na entressafra em um solo de cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, p. 1269-1276, 2007.
- BORTOLUZZI, E.C.; ELTZ F.L.F. Manejo da palha de aveia preta sobre as plantas daninhas e rendimento de soja em semeadura direta. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 31, n. 2, p. 237-243, 2001.
- BORTOLUZZI, E.C. *et al.* Alterações na mineralogia de um argissolo do Rio Grande do Sul submetido à fertilização potássica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 29, n. 3, p. 327-335, 2005.
- BORTOLUZZI, E.C. *et al.* Vermiculite, with hidroxy-aluminium interlayer, and kaolinite formation in a subtropical Sandy soil from South Brazil. **Clay Minerals**, London, v. 43, p. 185-193, 2008.
- BORTOLUZZI, E.C. *et al.* Mineralogical changes caused by grape production in a Regosol from subtropical Brazilian climate. **Journal of Soils and Sediments**, Heidelberg, v. 12, p. 854-862, 2012.
- BRUNETTO, G. *et al.* Nível crítico e resposta das culturas ao potássio em um Argissolo sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 29, n. 4, p. 569-571, 2005.
- CALEGARI, A. *et al.* Long-term effect of different soil management systems and winter crops on soil acidity and vertical distribution of nutrients in a Brazilian oxisol. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 133, p. 32-39, 2013.
- CAMPOS, B.M. **Estabelecimento do azevém anual em sistemas integrados de produção agropecuária: implicações do resíduo das lavouras de soja e milho**. 2015. 53 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.
- CARVALHO, P.C.F. *et al.* Avanços metodológicos na determinação do consumo por ruminantes em pastejo. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Piracicaba, v. 36, p. 151-170, 2007.
- CARVALHO, P.C.F. *et al.* **Integração soja-bovinos de corte no sul do Brasil**. Porto Alegre: UFRGS. Grupo de Pesquisa em Integração Lavoura-Pecuária, 2011. 60 p.

CECAGNO, D. *et al.* Least limiting water range and soybean yield in a long-term, no-till, integrated crop-livestock system under different grazing intensities. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 156, p. 54-62, 2016.

CHÁVEZ, L.F. *et al.* Diversidade metabólica e atividade microbiana no solo em sistema de integração lavoura-pecuária sob intensidades de pastejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, n. 10, p. 1254-1261, 2011.

CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Safra 2017/2018: sétimo levantamento. **Acompanhamento da safra brasileira: grãos**, Brasília, v. 5, n. 7, p. 1-139, abr. 2018. Monitoramento agrícola. Projeto Observatório Agrícola.

CONTE, O. *et al.* Relação entre resistência mecânica do solo à penetração e força de tração demandada por hastes sulcadoras de semeadoras-adubadoras, em sistema de integração lavoura-pecuária. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 28, p. 730-739, 2008.

CORRÊA, J.C.; REICHARDT, K. Efeito do tempo de uso das pastagens sobre as propriedades de um Latossolo Amarelo da Amazônia. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 30, n.1, p. 107-114, 1995.

CORTI, G. *et al.* Characteristics of rhizosphere soil from natural and agricultural environments. *In*: HUANG, P.M.; GOBRAN, G.R. (ed.). **Biogeochemistry of trace elements in the rhizosphere**. Oxford: Elsevier, 2005, p. 57-128.

CQFS-RS/SC – COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO. **Manual de calagem e adubação para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. [S.l.]: SBCS. Núcleo Regional Sul, 2016. 376 p.

CQFS-RS/SC – COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO. **Manual de adubação e de calagem para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. Porto Alegre: SBCS. Núcleo Regional Sul, 2004. 395 p.

CQFS-RS/SC – COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO **Recomendações de adubação e de calagem para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. [S.l.]: SBCS-NRS, 1995. 224 p.

CUNHA, J.F.; CASARIN, V.; PROCHNOW, L.I. Balanço de nutrientes na agricultura brasileira. *In*: PROCHNOW, L.I.; CASARIN, V.; STIPP, S.R. **Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes**. Piracicaba: IPNI, 2010. v. 2, p. 309-351.

DERPSCH, R.; SIDIRAS, N.; HEINZMANN, F.X. Manejo do solo com coberturas verdes de inverno. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 20, n. 7, p. 761-773, 1985.

DHILLON, S.K.; DHILLON, K.S. Kinetics of release of non-exchangeable potassium by cation saturated resins from red (Alfisols), black (Vertisols) and

alluvial (Inceptisols) soils of India. **Geoderma**, Amsterdam, v. 47, n. 3/4, p. 283-300, 1990.

DUBEUX JR, J. *et al.* Nutrient cycling in warm-climate grasslands. **Crop Science**, Madison, v. 47, n. 3, p. 915-928, 2007.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 2006. 306 p.

ERNANI, P.R.; ALMEIDA, J.A.; SANTOS, F.C. Potássio. *In*: NOVAIS, R.F. *et al.* **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: SBCS/UFV, 2007. p. 551-594.

FAGERIA, N.K.; STONE, L.F. Physical, chemical, and biological changes in the rhizosphere and nutrient availability. **Journal of Plant Nutrition**, Athens, v. 29, p. 1327-1356, 2006.

FAGERIA, N.K.; ARAÚJO, A.P.; STONE, L.F. Mudanças químicas na rizosfera. *In*: MELO, V.F.; ALLEONI, L.R.F. **Química e mineralogia do solo**. Viçosa, MG: SBCS/UFV, 2016. p. 161-186.

FERREIRA, E.V.O. *et al.* Concentração do potássio do solo em sistema de integração lavoura-pecuária em plantio direto submetido a intensidades de pastejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 33, n. 6, p. 1675-1684, 2009.

FERREIRA, E.V.O. *et al.* Ciclagem e balanço de potássio e produtividade de soja na integração lavoura-pecuária sob semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 35, n. 1, p. 161-169, 2011.

FIXEN, P.E. Reservas mundiais de nutrientes dos fertilizantes. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, v.126, p. 8-14, 2009.

FLORES, J.P.C. *et al.* Atributos químicos do solo em sistema de integração lavoura-pecuária sob plantio direto com aplicação superficial de calcário. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, p. 2385-2396, 2008.

GARCIA, R.A. *et al.* Potassium cycling in a corn-brachiaria cropping system. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 28, p. 579-585, 2008.

GATIBONI, L.C.; KAMINSKI, J.; SANTOS, D.R. Modificações nas formas de fósforo do solo após extrações sucessivas com Mehlich-1, Mehlich-3 e resina trocadora de ânions. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 29, n. 3, p. 363-371, 2005.

GIACOMINI, S.J. *et al.* 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, 2003.

GOBRAN, G.R. *et al.* Rhizospheric processes influencing the biogeochemistry of forest ecosystems. **Biogeochemistry**, The Hague, v. 42, p. 107-120, 1998.

GOMMERS, A.; THIRY, Y.; DELVAUX, B. Rhizospheric mobilization and plant uptake of radiocesium from weathered micas: I. Influence of potassium depletion. **Journal Environmental Quality**, Madison, v. 34, p. 2167-2173, 2005.

HAYNES, R.J.; WILLIAMS, P.H. Nutrient cycling and fertility in the grazed pasture ecosystem. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 49, p. 119-199, 1993.

HINSINGER, P. How do plant roots acquire mineral nutrients? Chemical processes involved in the rhizosphere. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 64, p. 225-265, 1998.

HINSINGER, P. *et al.* Root-induced irreversible transformation of a trioctahedral mica in the rhizosphere of rape. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 44, n. 3, p. 535-546, 1993.

HINSINGER, P.; JAILLARD, B. Root-induced release of interlayer potassium and vermiculation of phlogopite as related to potassium depletion in the rhizosphere of ryegrass. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 44, p. 525-534, 1993.

HOGG, D.E. A lysimeter study of nutrient losses from urine and dung applications on pasture. **New Zealand Journal of Experimental Agriculture**, Wellington, v. 9, p. 39-46, 1981.

HUTTON, J.B.; JURY, K.E.; DAVIES, E.B. Studies of the nutritive value of New Zealand dairy pastures. V. The intake and utilization of potassium, sodium, calcium, phosphorus and nitrogen in pasture herbage by lactating dairy cattle. **New Zealand Journal of Agricultural Research**, Wellington, v. 10, n. 3/4, p. 367-388, 1967.

INMET - INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **BDMEP - Banco de dados meteorológicos para ensino e pesquisa**. Brasília, DF, [2017].
Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>.
Acesso em: 21 nov. 2017.

JONES, D.L. Organic acids in the rhizosphere: a critical review. **Plant and Soil**, The Hague, v. 205, n. 1, p. 25-44, 1998.

JONES, D.L. *et al.* Organic acid behavior in soils – misconceptions and knowledge gaps. **Plant and Soil**, The Hague, v. 248, n. 1/2, p. 31-41, 2003.

JUNGK, A.O. Dynamics of nutrient movement at the soil-root interface. *In*: WAISEL, Y.; ESHEL, A.; KAFKAFI, U. (ed.). **Plant roots: the hidden half**. New York: Marcel Dekker, 2002. p. 587-616.

JUNGK, A.O.; CLAASSEN, N. Ion diffusion in the soil-root system. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 61, p. 53-110, 1997.

KAMINSKI, J. *et al.* Depleção de formas de potássio do solo afetada por cultivos sucessivos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 31, n. 5, p. 1003-1010, 2007.

KLEPKER, D.; ANGHINONI, I. Modos de adubação, absorção de nutrientes e rendimento de milho em diferentes preparos de solo. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, Porto Alegre, v. 2, n. 1, p. 79-86, 1996.

KOTTEK, M. *et al.* World map of the Köppen-Geiger climate classification update. **Meteorologische Zeitschrift**, Frankfurt, v. 15, p. 259-263, 2006.

KUCHENBUCH, R. Importancia de los procesos de intercambio de iones en el suelo proximo a las raices para la disponibilidad de potasio para las plantas. **Revista de la Potasa**, Berna, v. 1, p. 1-12, 1985.

KUCHENBUCH, R.; JUNGK, A. A method for determining concentration profiles at the soil-root interface by thin slicing rhizosferic soil. **Plant and Soil**, The Hague, v. 68, n. 3, p. 391-394, 1982.

KUNRATH, T.R. *et al.* Grazing management in an integrated crop-livestock system: soybean development and grain yield. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 46, n. 3, p. 645-653, 2015.

LEDGARD, S.F. Nitrogen cycling in low input legume-based agriculture, with emphasis on legume/grass pastures. **Plant and Soil**, The Hague, v. 228, n. 1, p. 43-59, 2001.

LOPES, M.L.T. *et al.* Sistema de integração lavoura-pecuária: efeito do manejo da altura de pastos de aveia-preta e azevém anual sobre o rendimento da cultura da soja. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, n. 5, p. 1499-1506, 2009.

LUSTOSA, S.B.C. **Efeito do pastejo nas propriedades químicas do solo e no rendimento de soja e milho em rotação com pastagem consorciada de inverno no sistema de plantio direto**. 1998. 84 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1998.

LYNCH, J.M.; WHIPPS, J.M. Substrate flow in the rhizosphere. **Plant and Soil**, The Hague, v. 129, n. 1, p. 1-10, 1990.

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

MARTENS, J.R.T.; ENTZ, M.H. Integrated green manure and grazing systems: a review. **Canadian Journal of Plant Science**, Ottawa, v. 91, p. 811-824, 2011.

MARTHA JUNIOR, G.B.; ALVES, E.; CONTINI, E. Dimensão econômica de sistemas de integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, n. 46, p. 1117-1126, 2011.

MARTIN, H.W.; SPARKS, D.L. On the behavior of nonexchangeable potassium in soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 16, p. 133-162, 1985.

MARTINS, A.P. *et al.* **Integração soja-bovinos de corte no sul do Brasil**. 2. ed. Porto Alegre: UFRGS. Grupo de Pesquisa em Sistema Integrado de Produção Agropecuária, 2015. 102 p.

MARTINS, A.P. *et al.* Soil acidification and basic cation use efficiency in an integrated no-till crop-livestock system under different grazing intensities. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 195, p. 18-28, 2014.

MEHTA, S.C.; MEEL, K.S.; GREWAL, E.A. Release of non-exchangeable potassium in Entisols. **Journal of the Indian Society of Soil Science**, Delhi, v. 43, p. 351-356, 1995.

MELO, V.F. *et al.* Formas de potássio e de magnésio em solos do Rio Grande do Sul, e sua relação com o conteúdo na planta e com a produção em plantios de eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 19, p. 165-171, 1995.

MELO, V.F.; CASTILHOS, R.M.V.; PINTO, L.F.S. Reserva mineral do solo. *In*: MELO, V.F.; ALLEONI, L.R.F. (ed.). **Química e mineralogia do solo**, Viçosa, MG: SBCS, 2016. p. 252-321.

MENGEL, K.; KIRKBY, E.A. Potassium. *In*: MENGEL, K.; KIRKBY, E. A. **Principles of plant nutrition**. Bern: International Potash Institute, 1987. p.115-138.

MENGEL, K. *et al.* **Principles of plant nutrition**. 5th ed. Dordrecht: Kluwer, 2001. 849 p.

MEURER, E.J.; CASTILHOS, R.M.V. Liberação de potássio de frações de solos e sua cinética. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 25, p. 823-829, 2001.

MEURER, E.J.; ANGHINONI, I. Utilização de modelo mecanístico para avaliação da disponibilidade de potássio em solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 18, p. 73-80, 1994.

MEURER, E.J.; ROSSO, J.I. Cinética de liberação de potássio em solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 21, n. 4, p. 553-558, 1997.

MEURER, E.J.; TIECHER, T.; MATTIELLO, L. Potássio. *In*: FERNANDES M.S.; SOUZA, S.R.; SANTOS, L.A. (ed.). **Nutrição mineral de plantas**. 2. ed. Viçosa, MG: SBCS, 2018. p. 429-464.

MIELNICZUK, J. Manejo conservacionista da adubação potássica. *In*: YAMADA, T.; ROBERTS, T.L. **Potássio na agricultura brasileira**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 2005. p.165-178.

MIELNICZUK, J.; SELBACH, P.A. Capacidade de suprimento de potássio de seis solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 2, n. 2, p. 115-120, 1978.

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.

MORAES, A. *et al.* Integrated crop-livestock systems in the Brazilian subtropics. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 57, p. 4-9, 2014.

MOREIRA, F.M.S.; SIQUEIRA, J.O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. Lavras: UFLA, 2002. 625 p.

MOTERLE, D.F. *et al.* Impact of potassium fertilization and potassium uptake by plants on soil clay mineral assemblage in South Brazil. **Plant and Soil**, The Hague, v. 406, p. 157-172, 2016.

MOTERLE, D.F. **Disponibilidade de potássio afetada por cultivos em solos com longo histórico de adubação**. 2008. 110 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

NACHTIGALL, G.R.; VAHL, L.C. Formas de potássio em solos da região sul do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 13, p. 7-12, 1989.

NACHTIGALL, G.R.; VAHL, L.C. Capacidade de suprimento de potássio dos solos da região sul do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 15, n. 1, p. 37-42, 1991.

NASCIMENTO JUNIOR, D.; CAVALCANTE, M.A.B. **Reciclagem de excreções animais na pastagem**. [Viçosa, MG], 2001. Disponível em: <http://atividaderural.com.br/artigos/530f7869070b4.pdf>. Acesso em: 14 mar. 2018.

NEUMAN, G.; RÖMHELD, V. Root-induced changes in the availability of nutrients in the rhizosphere. *In*: WAISEL, Y.; ESHEL, A.; KAFKAFI, U. (ed.). **Plant roots: the hidden half**. 3rd ed. New York: M. Dekker, 2002. p. 617-649.

- NICOLOSO, R.S. *et al.* Balanço de carbono orgânico no solo sob integração lavoura-pecuária no sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, p. 2425-2433, 2008.
- NIEBES, J.F. *et al.* Release of nonexchangeable potassium from different size fraction of two highly K-fertilized soil in the rhizosphere of rape (*Brassica napus* cv drakkar). **Plant and Soil**, The Hague, v. 155/156, p. 403-406, 1993.
- PACHECO, L.P. *et al.* Produção e ciclagem de nutrientes por plantas de cobertura nas culturas de arroz de terras altas e de soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 35, p. 1787-1789, 2011.
- PANSU, M.; GAUTHEYROU, J. **Handbook of soil analysis: mineralogical, organic and inorganic methods**. Berlin: Springer-Verlag, 2006. 993 p.
- PAOLA, A. *et al.* Short term clay mineral release and re-capture of potassium in a *Zea mays* field experiment. **Geoderma**, Amsterdam, v. 264, p. 54-60, 2016.
- PEREIRA, M.W.G.; ARÊDES, A.F.; TEIXEIRA, E.C. Avaliação econômica do cultivo de trigo dos Estados do Rio Grande do Sul e Paraná. **Revista de Economia e Agronegócio**, Viçosa, MG, v. 5, n. 4, p. 591-610, 2007.
- PHILLIPS, R.P.; FAHEI, T.J. The influence of soil fertility on rhizosphere effects in Northern Hardwood forest soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 72, p. 453-461, 2008.
- PINTON, R.; VARANINI, Z. The rhizosphere as a site of biochemical interactions among soil components, plants and microorganisms. *In*: PINTON, R.; VARANINI, Z.; NANNIPIERI, P. (ed.). **The rhizosphere: biochemical and organic substances at the soil-plant interface**. New York: CRC Press, 2001. p. 1-17.
- PITTELKOW, C.M. *et al.* Productivity limits and potentials of the principles of conservation agriculture. **Nature**, London, v. 517, p. 365-367, 2014.
- PRATT, P.F. Potassium. *In*: BLACK, C.A. **Methods of soil analysis**. 3rd. ed. Madison: American Society of Agronomy, 1973. p. 1022-1030.
- RITCHEY, K.D. (ed.). **O potássio nos oxissolos e ultissolos dos trópicos úmidos**. Piracicaba: Instituto da Potassa e Fosfato; Instituto Internacional da Potassa 1982. 69 p. (Boletim Técnico, 7).
- ROSOLEM, C.A.; BESSA, A.; PEREIRA, H.F.M. Dinâmica do potássio no solo e nutrição potássica da soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 28, n. 9, p. 1045-1054, 1993.
- ROSOLEM, C. A. *et al.* Potássio no solo em consequência da adubação sobre a palha de milho e chuva simulada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 6, p. 1033-1040, 2006.

- ROTZ, C.A. *et al.* Whole-farm perspectives of nutrient flows in grassland agriculture. **Crop Science**, Madison, v. 45, p. 2139-2159, 2005.
- RUSSELLE, M.P. Nutrient cycling in pasture. *In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL SOBRE PRODUÇÃO ANIMAL EM PASTEJO*, 1997, Viçosa, MG. **Anais...** Viçosa, MG: UFV, 1997. p. 235-266.
- RUSSELLE, M.P.; ENTZ, M.H.; FRANZLUEBBERS, A.J. Reconsidering integrated crop-livestock systems in North America. **Agronomy Journal**, Madison, v. 99, p. 325-334, 2007.
- SANTOS, H.P.; TOMM, G.O. Estudos da fertilidade do solo sob quatro sistemas de rotação de culturas envolvendo trigo em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 20, p. 407-414, 1996.
- SANTOS, H.P.; FONTANELI, R.S.; TOMM, G.O. Efeito de sistemas de produção de grãos e de pastagens sob plantio direto sobre o nível de fertilidade do solo após cinco anos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 25, n. 3, p. 645-653, 2001.
- SANTOS, H.P. *et al.* Efeito de sistemas de produção mistos sob plantio direto sobre fertilidade do solo após oito anos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 27, n. 3, p. 545-552, 2003.
- SCHULTE, E.E.; COREY, R.B. Extraction of potassium from soil with sodium tetraphenylboron. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 29, n. 1, p. 33-35, 1965.
- SILVA, R.F. *et al.* Análise conjunta de atributos físicos e biológicos do solo sob sistema de integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, n. 10, p. 1277-1283, 2011.
- SOUTO, M.S. **Pastagem de aveia e azevém na integração lavoura-pecuária: produção de leite e características do solo**. 2006. 80 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.
- SOUZA, E.D. *et al.* Soil aggregation in a crop-livestock integration system under no-tillage. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 34, n. 4, p. 1365-1374, 2010a.
- SOUZA, E.D. *et al.* Biomassa microbiana do solo em sistema de integração lavoura-pecuária em plantio direto, submetido a intensidades de pastejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 34, n. 1, p. 74-88, 2010b.
- SPARKS, D.L.; HUANG, P.M. Physical chemistry of soil potassium. *In: MUNSON R.D. (ed.). Potassium in agriculture*. Madison: American Society of Agronomy, 1985. p. 202-276.

- SPOSITO, G. **The chemistry of soil**. 2nd ed. New York: Oxford University Press, 2008. 329 p.
- SPOSITO, G. **The chemistry of soil**. New York: Oxford University Press, 1989. 227 p.
- SPOSITO, G. **The surface chemistry of soils**. New York: Oxford University Press, 1984. 234 p.
- STRECK, E.V. *et al.* **Solos do Rio Grande do Sul**. 2. ed. Porto Alegre: Emater/RS, 2008. 222 p.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 3. ed. Porto Alegre: Artmed, 2004. 720 p.
- TIECHER, T. *et al.* **Evolução e estado da fertilidade do solo no Norte do Rio Grande do Sul e Sudoeste de Santa Catarina**, Porto Alegre: UFRGS, 2016. 53 p.
- TIECHER, T. *et al.* Soil fertility and nutriente budget after 23-years of different soil tillage systems and winter cover crops in a subtropical oxisol. **Geoderma**, Amsterdam, v. 308, p. 78-85, 2017.
- TISDALE, S.L.; NELSON, W.L. **Soil fertility and fertilizers**. 5th ed. New York: Macmillan, 1993. 634 p.
- TORRES, J.L.R.; PEREIRA, M.G.; FABIAN, A.J. Produção de matéria seca por plantas de cobertura e mineralização de seus resíduos em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Viçosa, MG, v. 43, p. 421-428, 2008.
- TRIBUTH, H. Effect of potassium removal by crops on transformation of illitic clay minerals. **Soil Science**, Philadelphia, v. 143, n. 6, p. 404-409, 1987.
- UREN, N.C. Types, amounts, and possible functions of compounds released into the rhizosphere by soil-grown plants. *In*: PINTON, R.; VARANINI, Z.; NANNIPIERI, P. **The rhizosphere: biochemistry and organic substances at the soil-plant interface**. Boca Raton: CRC Press, 2007. p. 1-21.
- VAN RAIJ, B. **Avaliação da fertilidade do solo**. Piracicaba: Instituto da Potassa e Fosfato, 1981. 142p.
- VARGAS, R.L. Teores de macronutrientes e micronutrientes em sementes de soja. 2014. 61 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Sementes, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2014.
- VIOLANTE, A.; CAPORALE, A.G. Biogeochemical processes at soil-root interface. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, Chillán, v. 15, p. 422-448, 2015.

WELCH, L.F.; SCOTT, A.D. Availability of nonexchangeable soil potassium to plants as affected by added potassium and ammonium. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 25, p. 102-104, 1961.

WILLIAMS, P. Nutritional composition of red meat. **Nutrition & Dietetics**, Deakin, v. 64, p. 113-119, 2007.