

BASES TEÓRICAS E EXPERIMENTAIS DE FATORES RELACIONADOS COM A DISPONIBILIDADE DE POTÁSSIO DO SOLO ÀS PLANTAS USANDO TRIGO COMO REFERÊNCIA⁽¹⁾

Sirio Wiethölter⁽²⁾

RESUMO

O grau de disponibilidade de nutrientes no solo para as plantas é um dos principais fatores que determinam a capacidade produtiva das culturas. Modelos matemáticos têm sido propostos para simular o fluxo de nutrientes para raízes, levando em consideração diversos parâmetros físicos e químicos do solo e fatores anatômicos e fisiológicos da raiz. No presente trabalho, objetivou-se estabelecer uma relação entre o modelo teórico de difusão de Baldwin e os resultados experimentais de campo, envolvendo a resposta da cultura do trigo à aplicação de K ao solo. Com base em simulações com o modelo teórico, constatou-se que solos com poder-tampão de K 3,6 vezes maior proporcionariam absorção de K pelas raízes três vezes menor. Um modelo empírico derivado de três experimentos de campo com trigo indicou interação significativa entre os seguintes fatores: rendimento de grãos de trigo, teor de argila, dose de K aplicada e teor de K no solo. Quanto maior o teor de argila do solo, maior foi a dose de K_2O necessária para atingir certo rendimento de trigo. O modelo indicou que cada 10 % a mais de argila aumenta a demanda de aplicação de K_2O em 8 a 9 kg ha⁻¹. Quando o teor de K no solo foi superior a 40 mg dm⁻³, houve tendência de a dose de K a ser aplicada decrescer gradualmente, podendo essa concentração ser definida como nível mínimo para o desenvolvimento de trigo nos solos estudados. Essas constatações permitem inferir que o teor de argila, ou outro fator a ela relacionado, como o poder-tampão ou a capacidade de troca de cátions, poderia ser incorporado em sistemas de recomendação de K, visto que esses fatores têm relação com as variáveis do modelo de difusão de Baldwin.

Termos para indexação: trigo, potássio, solo, argila, modelo de difusão, nível crítico difusivo.

⁽¹⁾ Recebido para publicação em agosto de 2006 e aprovado em maio de 2007.

⁽²⁾ Pesquisador da Embrapa, Centro Nacional de Pesquisa de Trigo, Caixa Postal 451, CEP 99001-970 Passo Fundo (RS). E-mail: siriow@cnpt.embrapa.br

SUMMARY: THEORETICAL AND EXPERIMENTAL BASES OF FACTORS RELATED TO SOIL POTASSIUM AVAILABILITY TO PLANTS USING WHEAT AS REFERENCE

The degree of soil nutrient availability to plants is one of the major factors determining crop production. Mathematical models have been proposed to simulate nutrient flux toward roots, taking into account several physical and chemical soil parameters as well as anatomical and physiological root traits. The objective of this paper was to establish a relationship between Baldwin's theoretical diffusion model and experimental field data involving the response of wheat to K fertilization. Based on simulations with the theoretical model, it was observed that soils with a 3.6 times higher K buffer power would result in 3 times lower K root absorption. An empirical model derived from three wheat field experiments indicated significant interaction among the following factors: grain yield, soil clay content, applied K rate, and soil K content. The higher the clay content, the greater the K rate necessary for a given wheat yield. The model indicated that for every 10 % more clay the K₂O demand would increase by 8 to 9 kg ha⁻¹. When the soil K content was above 40 mg dm⁻³ there was a tendency to gradually decrease the amount of K to be applied for any soil clay content, indicating that the minimum K level for wheat development for the studied soils was about this concentration. These observations may imply that soil clay content, or any other soil factor related to it, such as the soil K buffer power or cation exchange capacity, could be incorporated into K fertilizer recommendation, once these factors present a relationship with Baldwin's diffusion model variables.

Index terms: wheat, potassium, soil, clay, diffusion model, diffusive critical level.

INTRODUÇÃO

Um dos grandes desafios da ciência agrônômica é o estabelecimento de provas matemáticas que demonstrem a interação de fatores do ambiente (solo, água, atmosfera) e o desenvolvimento de plantas. Por razões de praticidade experimental e o necessário isolamento do efeito líquido de cada fator, a grande maioria dos dados publicados refere-se a estudos detalhados de casos pontuais, sem que seja possível estabelecer uma relação de dependência matemática entre distintos fatores ambientais (atributos do solo, por exemplo) que determinam as grandes tendências do desenvolvimento de plantas, nem criar um mecanismo de previsão geral dos fenômenos envolvidos (Novais, 1996). No entanto, na realidade das condições de campo, a interação entre muitos fatores sempre ocorre em um agroecossistema (Peterson et al., 1993). A análise do solo de alguns nutrientes – de P e de K, por exemplo – geralmente propicia informações que permitem interpretação agrônômica razoavelmente objetiva dos teores encontrados e do possível grau de desenvolvimento de plantas nesse solo. A demonstração matemática da interação entre muitos fatores de solo e planta geralmente não é simples. Mais complexa ainda é a modelagem do desenvolvimento e da absorção de nutrientes ao longo do ciclo de crescimento de plantas. Contudo, alguns modelos mecanísticos que descrevem as reações químicas de caráter dinâmico no solo, bem como sua associação com modelos que caracterizam a contribuição de fatores relacionados ao sistema radicular (geometria e fisiologia da

absorção de nutrientes), podem auxiliar no entendimento da importância de parâmetros, assim como explicar as causas das interações presentes nos dados experimentais.

O estágio atual de uso da análise de solo para fins de recomendação de nutrientes é decorrente de métodos analíticos propostos principalmente na década de 1950. Já o conhecimento dos princípios da disponibilidade de nutrientes às plantas é resultante de informações agregadas a partir da década de 1950 (Bray, 1954; Bouldin, 1961; Barber, 1962, 1995; Tinker & Nye, 2000). Dessa forma, atualmente há certo grau de descompasso entre a base de conhecimento científico sobre a mobilidade de nutrientes no solo e sua relação com a disponibilidade efetiva às plantas e o uso prático da análise de solo para fins de avaliação da sua fertilidade.

Objetivou-se estabelecer a relação entre princípios que regem a dinâmica de K no solo e sua absorção por plantas e resultados experimentais de campo, sob os seguintes aspectos: (a) as reações de troca de K no solo (a dinâmica química, intrínseca do solo); (b) a descrição de um modelo matemático mecanístico de previsão de absorção em função de fatores de difusão no solo e de parâmetros da planta (a cinética do fluxo de nutrientes no solo e a dinâmica das relações solo-planta) (Baldwin et al., 1973); e (c) a analogia existente entre o modelo de Baldwin e a descrição de dados experimentais de resposta de trigo a K em solos distintos, por meio de um modelo empírico genérico derivado desses dados.

PRINCÍPIOS

Reações de troca de cátions no solo

Na maioria dos solos com pH superior a 5,5 há predominância de cargas eletrostáticas negativas. Como na natureza não há sobra de carga (ou se formaria um potencial elétrico), os sítios negativos na superfície das partículas dos argilominerais e na região da dupla camada difusa sempre estarão ocupados por cátions. Nesse processo há um fluxo contínuo de cátions entre as fases líquida e sólida do solo, motivado pela movimentação da água, pela absorção de nutrientes pelas raízes das plantas e pela adsorção do solo.

A relativa preferência ou especificidade dos sítios de troca das partículas determina a quantidade de um determinado cátion que um solo pode reter. Esse processo pode ser descrito por uma equação análoga à lei de ação de massa. A equação mais utilizada para quantificar esse fenômeno foi adaptada de uma equação proposta por Gapon (1933). No solo, os principais cátions são: H^+ , K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Mn^{2+} e Al^{3+} . Toda vez que houver alteração do teor de um desses elementos, seja por adição ou absorção pelas raízes, o equilíbrio será alterado. Dessa forma, no solo, quimicamente, existe somente um estado de quase-equilíbrio, pois as trocas dos elementos, entre as fases, são contínuas. Tinker & Nye (2000, p.297) definiram essa situação como sendo um estado transitório, pois, em qualquer ponto do solo, os fluxos e as concentrações dos elementos variam com o tempo.

Para simplificar as reações dos cátions mais importantes, ou geralmente presentes em maior quantidade, supor-se-á que o solo possui, no seu complexo de troca, apenas Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ . Nesse caso, poder-se-ia representar o processo de troca de cátions divalentes ($Ca + Mg = D$) e o K entre a solução do solo e as partículas sólidas pela seguinte expressão:



Doravante, parênteses () representam atividade ($mmol L^{-1}$ de solução do solo), colchetes [] representam concentração na fase trocável ($mmol kg^{-1}$ de solo) ou na solução do solo ($mmol L^{-1}$ de solução do solo) e chaves { } representam concentração na fase trocável ($mmol_c kg^{-1}$ de solo).

Pela equação de Gapon, a quantificação da reação (1) pode ser representada pela seguinte equação:

$$k_D^K = \frac{\{KX\} (D^{2+})^{1/2}}{\{D\frac{1}{2}X\} (K^+)} \quad (2)$$

em que

$$\{D\frac{1}{2}X\} = \{Ca\frac{1}{2}X\} + \{Mg\frac{1}{2}X\} \quad (3)$$

ou seja, a soma de Ca e de Mg trocáveis, expressos em $mmol_c kg^{-1}$ de solo.

(K^+) e (D^{2+}) constituem a atividade, expressa em $mmol L^{-1}$ de solução do solo, resultante da

multiplicação da concentração [] pelo coeficiente de atividade do cátion monovalente (γ^+) e divalente (γ^{2+}), respectivamente. O parâmetro X^{-1} representa um sítio negativo de adsorção; $\{KX\}$ é igual à concentração de K trocável, em $mmol_c kg^{-1}$ de solo – neste caso, igual a $mmol kg^{-1}$ de solo; e k_D^K é o coeficiente de seletividade entre K e os cátions divalentes, expresso em $(mmol L^{-1})^{1/2}$.

A atividade dos cátions divalentes (D^{2+}) não pode ser expressa simplesmente pela soma das atividades de Ca e de Mg , pois o solo não apresenta igual afinidade por esses cátions, ou seja, $k_{Ca}^{Mg} \neq 1$. Eles necessitam ser expressos em equivalência de um dos cátions. Dessa forma, a atividade dos cátions divalentes, expressos em equivalência de Ca , pode ser representada pela seguinte equação (Wiethölter & Corey, 1994):

$$(D^{2+})_{Ca} = (Ca^{2+}) + k_{Ca}^{Mg} (Mg^{2+}) \quad (4)$$

em que, à semelhança da equação (2),

$$k_{Ca}^{Mg} = \frac{[MgX] (Ca^{2+})}{[CaX] (Mg^{2+})} \quad (5)$$

sendo k_{Ca}^{Mg} o coeficiente de seletividade representando a preferência dos sítios de troca por Ca ou por Mg . Como k_{Ca}^{Mg} é menor que 1, as cargas negativas do solo têm preferência por Ca .

Na equação (5), os colchetes [] representam concentração em $mmol kg^{-1}$, uma vez que as valências de Ca e de Mg são iguais. Dessa forma, para assegurar estequiometria química em relação à equação (2):

$$\{D\frac{1}{2}X\} = 2 (\{CaX\} + \{MgX\}) \quad (6)$$

em que $\{D\frac{1}{2}X\}$ é expresso em $mmol_c kg^{-1}$ de solo.

A equação (4), portanto, ajusta a atividade do Mg em relação à do Ca , para compensar a preferência dos sítios de adsorção por Ca . Assim, por exemplo, se k_{Ca}^{Mg} for igual a 0,7 (Ciprandi & Wiethölter, 1994), significa que Ca é preferido, em relação a Mg , pelas cargas negativas do solo, e a atividade do Mg na solução do solo será maior que a do Ca , para uma mesma quantidade total dos dois cátions. Assim, para manter a mesma quantidade de sítios de troca saturados com Ca , a atividade de Mg deve ser representada como tendo sido diminuída (pelo valor de 0,7), para compensar a sua preferência em permanecer na solução do solo. A atividade de Mg convertida em atividade de Ca é a seguinte:

$$(Ca^{2+}) = k_{Ca}^{Mg} (Mg). \quad (7)$$

Pelo exposto, a equação (4) torna-se uma forma prática de estimar a atividade dos cátions divalentes, que competirão pelos mesmos sítios de adsorção que o K , conforme apresentado na equação (2). Pode-se reconhecer que as equações (4) e (7) são, na realidade, uma aplicação da lei dos quocientes, enunciada por

Schofield (1947), que diz que, “quando cátions em solução estão em equilíbrio com uma quantidade maior de cátions trocáveis, uma mudança na concentração (mais exatamente dever-se-ia falar em atividade em vez de concentração) da solução do solo não afetará os seguintes quocientes: $[Na^+]/[K^+]$, $[K^+]/[Ca^{2+}]^{1/2}$ ou $[K^+]/[Al^{3+}]^{1/3}$ ”. Ou seja, os quocientes dos cátions na solução do solo são constantes, conquanto os cátions divalentes sejam expressos na raiz quadrada e os trivalentes, na raiz cúbica. Assim, as relações $[K^+]/[Ca^{2+}]^{1/2}$ ou $[Ca^{2+}]/[Mg^{2+}]$ permanecerão constantes, desde que haja quantidade bem maior destes cátions na forma trocável. Em outras palavras, reescrevendo a equação (7), a lei de Schofield pode ser representada pela equação (8):

$$k_{Ca}^{Mg} = (Ca^{2+}) / (Mg^{2+}). \quad (8)$$

Se, por exemplo, o solo tem seu teor de água reduzido, a atividade de K e dos demais cátions aumentará. Em conseqüência, o teor de Ca e de Mg aumentará bem mais, pois a relação

$$\frac{(K^+)}{(Ca^{2+} + Mg^{2+})^{1/2}} \quad (9)$$

denominada de quociente de atividade (uma medida da intensidade de K lábil do solo), se manterá constante, segundo a lei de Schofield. Dessa maneira, o Ca e o Mg serão deslocados da fase trocável e o K irá ocupar essas cargas negativas. De forma análoga, se as plantas estão absorvendo K, o Ca e o Mg da solução irão para a fase trocável, deslocando K e outros cátions, de maneira a manter constante a quantidade de moles de carga positiva e negativa na solução do solo. Cabe ressaltar que a concentração total de cátions na solução do solo (H^+ , NH_4^+ , K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} , Mn^{2+} , Zn^{2+} , Cu^{2+} , Co^{2+} e Al^{3+}) será sempre controlada pelo teor total de ânions (NO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , $H_2PO_4^-$, HPO_4^{2-} , PO_4^{3-} , HCO_3^- , CO_3^{2-} , BO_3^- , $B_4O_7^{2-}$ e MoO_4^{2-}). Na prática, os cátions e ânions que efetivamente controlam a neutralidade elétrica da solução do solo são os seguintes: Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , H^+ , NO_3^- , SO_4^{2-} e Cl^- .

Efeito da adição de K ao solo na concentração de outros cátions

Supondo que o solo não tenha a sua capacidade de troca de cátions (CTC) afetada pela adição de K e que a CTC seja representada pela soma de Ca e de Mg da dupla camada difusa, nesse caso, uma maneira de expressar o efeito da adição de K ao solo, nas concentrações de K na solução do solo e na fase trocável, é reescrever a equação (2) nos seguintes termos (Wiethölter & Corey, 1995):

$$\frac{\{KX\} + \Delta\{KX\}}{\{D_{1/2}X\} - \Delta\{KX\}} = k_D^K \frac{(K^+) + \Delta(K^+)}{[(D^{2+})_{Ca} + \Delta\{KX\}]^{1/2}} \quad (10)$$

A equação anterior pressupõe que tenha sido adicionada ao solo uma quantidade total de K (K_T) que pode ser expressa pela seguinte partição entre a fase trocável $\Delta\{KX\}$ e a solução do solo $\Delta(K^+)$:

$$K_T = \Delta\{KX\} + \Delta(K^+). \quad (11)$$

Analisando a equação (10), observa-se que o quociente dos cátions adsorvidos (lado esquerdo) é igual ao quociente dos cátions na solução do solo multiplicada pelo coeficiente k_D^K .

No numerador do lado esquerdo da equação (10), verifica-se que a adição de K ao solo aumenta o teor de K trocável, numa quantidade equivalente a $\Delta\{KX\}$. No numerador do lado direito, o teor de K na solução do solo aumenta em $\Delta(K^+)$. No denominador do lado esquerdo da equação (10), em contrapartida, o teor de Ca e de Mg trocáveis, $\{D_{1/2}X\}$, terá redução igual à adição de K trocável, $\Delta\{KX\}$. No denominador do lado direito, as quantidades de Ca e de Mg trocáveis que foram deslocadas para a solução irão aumentar o teor de Ca e de Mg na solução $(D^{2+})_{Ca}$, numa quantidade equivalente ao seu deslocamento da fase trocável, $\Delta\{KX\}$. Contudo, o novo teor de Ca e de Mg na solução será igual à raiz quadrada da soma do teor original de Ca e de Mg mais a adição de K, $\Delta\{KX\}$ (o valor numérico obviamente deverá ser convertido de $mmol_c \text{ kg}^{-1}$ para $mmol \text{ L}^{-1}$ de solução). Dessa forma, é possível prever a dinâmica de K no solo em conseqüência da adição ou remoção de K, de Ca ou de Mg. Estes são os parâmetros físico-químicos intrínsecos do solo que controlam a dinâmica de K e determinam a disponibilidade do elemento para as plantas, conforme proposto nos objetivos do trabalho.

A equação (10) poderia ser usada, por exemplo, para estabelecer a dose de K a ser aplicada para o solo atingir o teor mínimo necessário ao desenvolvimento de plantas, geralmente definido como nível de suficiência ou nível crítico. Assim, se fosse conhecido de antemão o valor de k_D^K (0,34, segundo Ciprandi & Wiethölter, 1994) e se fossem determinadas as concentrações de K (KX) e de Ca + Mg trocáveis ($D_{1/2}X$) e na solução do solo (K^+ , D^{2+}), poder-se-ia derivar, por meio de cálculo iterativo, a quantidade de K a adicionar ao solo para atingir o nível desejado de K trocável no solo, o que geralmente é definido como capacidade-tampão do solo.

Ainda pode ser observado nas equações (2) e (10) que, se a concentração trocável de Ca e de Mg $\{D_{1/2}X\}$ fosse representada pela CTC, e se ela aumentasse pela adição de matéria orgânica por exemplo, conforme observado por Bayer & Mielniczuk (1997), ou pela calagem (Mielniczuk, 1977), o teor de K na solução iria diminuir e, portanto, diminuir sua disponibilidade às plantas em razão do aumento do poder-tampão do solo por K (Mielniczuk, 2005). Assim, com base nos dados de Silva & Meurer (1988) e de Meurer & Anghinoni (1993), foi incluída a CTC na interpretação do teor de K do solo para fins de recomendação da dose de K nos Estados do Rio Grande do Sul e de Santa

Catarina (SBCS, 2004), a exemplo do proposto por Fisher (1974), McLean (1976) e Eckert (1994).

Deve ser ressaltado que as equações (2), (5) e (10) não incluem adsorção específica (ligação covalente, de alta energia de retenção) ou as reações envolvendo K não-trocável, que, em alguns solos, podem ser importantes, especialmente se for considerada a absorção de K na zona de depleção da rizosfera ocupada por pêlos radiculares.

O processo de disponibilidade de potássio no solo para as plantas

Nos tópicos anteriores foi apresentada a dinâmica das reações de troca de K, Ca e Mg entre a solução do solo e a fase trocável sem abordar a dinâmica do K no solo em relação à sua absorção pelas plantas, que é, em essência, o objeto de estudo da fertilidade do solo, pois esta trata da capacidade de suprimento de nutrientes pelo solo e da habilidade das plantas em absorver os nutrientes.

Muito tem sido publicado, nos últimos 50 anos, sobre o processo de transporte de íons no solo na direção das raízes, a partir dos trabalhos de Bray (1954), Bouldin (1961) e Barber (1962). Esses trabalhos formaram a base do entendimento atual das relações entre o solo e as plantas, em termos dos processos de transporte por difusão e por fluxo de massa no solo e de absorção de nutrientes pelas raízes. Formou-se, assim, uma compreensão sobre a inter-relação entre mobilidade dos nutrientes no solo e disponibilidade dos nutrientes às plantas. No caso da difusão, a descrição matemática foi transposta de princípios usados na engenharia, mormente dos modelos de transferência de calor, descritos, com muita propriedade, por Carslaw & Jaeger (1959). Os parâmetros de transporte de calor foram convertidos em parâmetros de fluxo de íons no solo, na direção de um cilindro: a raiz. Muitas informações relacionadas a esse assunto constam nos livros publicados por Barber (1995) e por Tinker & Nye (2000).

O processo que envolve o transporte no solo e a absorção de nutrientes pelas plantas é bastante complexo. Dessa forma, é virtualmente impossível obter uma imagem física e um entendimento quantitativo satisfatório desse fenômeno se não forem usadas relações matemáticas. Com isso, podem ser feitas estimativas teóricas e práticas sobre a contribuição de cada fator.

Há vários enfoques para caracterizar a dinâmica, ou o movimento, de K no solo na direção das raízes de plantas. Para o propósito do presente trabalho, adotar-se-á o modelo derivado por Baldwin et al. (1973), pois este é simples na definição dos parâmetros de solo e de planta e possibilita entendimento da importância dos diversos parâmetros. De qualquer forma, nem o enfoque a seguir apresentado nem o modelo mais difundido (o de Barber) têm sido adaptados para predição da necessidade de fertilizantes, sendo, portanto, uma tarefa futura, visando, dessa maneira,

aumentar a eficiência da adubação. É possível até que os modelos propostos nunca venham a ser convertidos em procedimentos rotineiros. No entanto, a tendência atual, no caso de K (Skogley, 1994) e também no de P (Raij et al., 1986; Sharpley et al., 1994), é empregar alguns dos princípios do processo de difusão em si no desenvolvimento de novos métodos de análise de solo, para esses elementos. Em última instância, o próprio conceito de disponibilidade de nutrientes que são transportados pelo processo de difusão deverá ser reformulado, talvez empregando, no lugar da expressão “nível crítico” ou “nível de suficiência”, a definição de influxo total por unidade de segmento de raiz, denominado de “nível crítico difusivo” (Wiethölter, 1985; Corey, 1987), que envolve fatores associados a reações de troca no solo, características fisiológicas das raízes relacionadas à capacidade de absorção de nutrientes e modelos matemáticos.

O modelo de difusão de Baldwin

O fluxo de nutrientes por difusão, em especial de P e de K, da solução do solo para a superfície das raízes, ocorre em razão de um gradiente de concentração entre a superfície da raiz (ponto de menor concentração) e o restante da solução do solo (ponto de maior concentração). Esse processo cinético de transporte físico de um íon é denominado difusão. No caso do P, a difusão é o fenômeno mais importante, porque o seu teor na solução do solo é muito baixo. No caso do K, a difusão é o principal mecanismo, porque a quantidade absorvida pelas plantas usualmente é elevada. Outro mecanismo de transporte de nutrientes no solo é o fluxo de massa, que se constitui no movimento dos nutrientes junto com a água que é absorvida pelas plantas. Para alguns nutrientes, a difusão é mais importante; para outros, é o fluxo de massa.

Os fatores de solo que mais influenciam o processo de difusão são o teor de água (θ), a concentração do nutriente na solução do solo (C_{li}) e a habilidade da fase sólida do solo em realimentar a solução do solo (poder-tampão, b). Fatores importantes da planta são a geometria da raiz [raio (a) e a presença de pêlos radiculares, formando o cilindro equivalente] e as características fisiológicas relacionadas com a capacidade de absorção do nutriente (poder de absorção da raiz, α). A atuação de cada fator de solo e de planta no processo de difusão do íon no solo e absorção deste pela planta pode ser representada por modelos matemáticos. As pressuposições básicas de todos os modelos são de que o fluxo do nutriente é radial, na direção de uma superfície cilíndrica (a raiz), circundada por um meio (o solo) isotrópico (de características de difusão homogêneas). Com essa configuração física, a quantidade de um nutriente absorvido (Abs) por um segmento unitário de raiz, por unidade de tempo (t), pode ser representada pela equação derivada por Baldwin et al. (1973), ligeiramente modificada por Corey (1987) e por Tinker & Nye (2000):

$$\text{Abs} = C_{li} b \left\{ 1 - \exp \left[- \frac{2 \pi \alpha a L_v t}{b \left(1 + \frac{\alpha a}{D_b} \ln \frac{x}{1,65 a} \right)} \right] \right\} \quad (12)$$

em que: Abs = quantidade absorvida por unidade de volume de solo (cm^3) em tempo t ; C_{li} = concentração inicial do íon na fase líquida do solo (mmol cm^{-3} solução); b = poder-tampão do solo (capacidade do solo de reabastecer a solução do solo) [$(\text{mmol cm}^{-3} \text{ solo}) / (\text{mmol cm}^{-3} \text{ solução})$]; C = concentração lábil (teor adsorvido ao solo + teor na solução do solo); \exp = exponencial; π = parâmetro geométrico da raiz (circunferência/diâmetro); α = poder de absorção da raiz (fluxo de absorção dividido pela concentração na solução do solo na superfície da raiz) ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ de solução na raiz); a = raio da raiz (cm), definido como raio do cilindro equivalente, sendo igual ao raio da raiz mais o comprimento dos pêlos radiculares; L_v = densidade de comprimento de raízes (cm cm^{-3} de raiz no solo); t = tempo (s); D = coeficiente de difusão do íon no solo ($= D_1 \theta f/b$) ($\text{cm}^2 \text{ s}^{-1}$ de solo); \ln = logaritmo natural; x = meia distância entre raízes (cm), igual ao raio do cilindro de solo explorado pela raiz, sendo $x = 1/(\pi L_v)^{1/2}$; αa = coeficiente de demanda da raiz; D_b = capacidade de suprimento do solo ($= D_1 \theta f$, Tinker & Nye, 2000, p.78); D_1 = coeficiente de difusão na água ($\text{cm}^2 \text{ s}^{-1}$ de água); θ = teor volumétrico de água no solo ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ de água no solo); e f = fator de tortuosidade do caminho que o íon percorrerá entre a fase sólida do solo e a superfície da raiz ($\text{cm}^2 \text{ cm}^{-2}$ de solo na solução).

A equação (12) indica que a absorção de um íon pela planta é função de fatores do solo (C_{li} vezes b) multiplicados por um valor que varia entre zero e 1, denominado PST (a parte entre chaves). De acordo com a equação (12), o valor de PST (planta-solo-tempo) provém da interação entre parâmetros do solo (C_{li} , b , D , θ , f), da planta (α , a , L_v) e do tempo (t) de difusão.

Assim

$$\text{PST} = f(\text{parâmetros da planta, do solo e do tempo}) \quad (13)$$

$$\text{Abs} = C_{li} b (\text{PST}), \quad (14)$$

em que

$$0 < \text{PST} \leq 1. \quad (15)$$

Como o poder-tampão (b) é igual ao quociente entre a concentração lábil (C = trocável + solução do solo) e a concentração na solução do solo (C_{li}), ou seja:

$$b = C/C_{li}, \quad (16)$$

a equação (14) pode ser simplificada para

$$\text{Abs} = C (\text{PST}). \quad (17)$$

O valor de $\alpha a/D_b$ pode ser interpretado como um quociente entre a demanda da planta e a capacidade de suprimento do solo, assim,

$$\frac{\alpha a}{D_b} = \frac{\text{demanda da planta}}{\text{capacidade de suprimento do solo}} \quad (18)$$

ou seja, se o solo tiver alta capacidade de suprimento do nutriente e se a demanda da planta for alta, a absorção (Abs) será alta. Depreende-se também que, mesmo sendo alta a demanda da planta, se a capacidade de suprimento do solo for baixa, a taxa de absorção não poderá ser elevada.

Uma das dificuldades para visualizar a importância de cada parâmetro é a complexidade da equação (12). Esse é o caso do poder-tampão (b), pois ele está presente em vários fatores. No entanto, fazendo algumas substituições, pode-se simplificá-la, deixando o fator b expresso apenas uma vez. Dessa forma:

$$\text{Abs} = C \left\{ 1 - \exp \left[- \frac{2 \pi \alpha a L_v t}{b \left(1 + \frac{\alpha a}{D_1 \theta f} \ln \frac{x}{1,65 a} \right)} \right] \right\}. \quad (19)$$

Observa-se na equação (19) que no numerador da parte exponencial constam apenas fatores da raiz (α , a , L_v) e o tempo de difusão. Já no denominador há uma combinação de fatores da raiz (α , a , x) e do solo (b , D_1 , θ , f). Por conseguinte, verifica-se acentuada analogia entre os fenômenos representados nas equações (18) e (19). Os fatores αa (demanda da raiz) e a densidade de comprimento de raízes (L_v) obviamente apresentam interdependência; segundo Tinker & Nye (2000, p.299), se o valor da demanda da planta (αa) em relação à capacidade de suprimento do solo (D_b) for alto (> 5), a equação (19) permite estimar a absorção máxima para o valor específico de L_v . Simulações de absorção advindas de distintos valores de $\alpha a/D_b$, bem como de outros parâmetros da equação (19), foram realizadas por Smethurst & Comerford (1993), verificando-se a importância de L_v e θ . Dessa maneira, supondo que dois solos apresentassem os mesmos valores de quantidade lábil de K (C) e que os demais fatores do solo (D_1 , θ , f) e da planta (α , a , L_v) se mantivessem constantes, então o solo que mostrasse maior capacidade de retenção de K (b maior em função do conteúdo de argila, por exemplo) apresentaria menor disponibilidade de K, exigindo, dessa forma, maior adição de K que aquele solo que apresentasse valor menor de b , cujo princípio está demonstrado nas equações (20) e (21) e poderia ser incorporado nos sistemas de recomendação de adubação potássica.

MATERIAL E MÉTODOS

Foram realizados três experimentos com a cultura do trigo, nos municípios de Passo Fundo, Mato Castelhano e Marau, do Rio Grande do Sul, cujas características dos solos constam do quadro 1. Precedendo a instalação dos experimentos, foram realizados vários cultivos sem adição de K ao solo, visando reduzir o teor desse elemento a um nível deficiente para o trigo. Para proporcionar volume de solo com teor uniforme de K, as doses de K_2O foram aplicadas a lanço e incorporadas com arado, na profundidade de 15 a 20 cm, sendo realizada gradagem

Quadro 1. Características dos solos dos experimentos com trigo

Experimento	Ano	Solo	Unidade de mapeamento	Local	Teor de argila ⁽¹⁾	Teor inicial de K no solo ⁽²⁾
					%	mg dm ⁻³
1	1989	Latossolo Vermelho distrófico típico	Passo Fundo	Mato Castelhana	43	37
2	1990	Latossolo Vermelho distrófico típico	Passo Fundo	Passo Fundo	40	30
3	1991	Latossolo Vermelho aluminoférrico típico	Erechim	Marau	63	29

⁽¹⁾ Método do densímetro (Tedesco et al., 1995). ⁽²⁾ Método de Mehlich-1 (Tedesco et al., 1995).

logo depois. Durante o desenvolvimento da cultura do trigo não foi observado déficit hídrico. A cultivar foi BR-23. O delineamento experimental foi de blocos casualizados com quatro repetições. O tamanho das parcelas foi 5 x 18 m. Na análise conjunta dos dados de resposta do trigo a K e para derivar os modelos de regressão, empregou-se o procedimento Stepwise do SAS (1993).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Simulação teórica da absorção de K através da equação (19)

O valor de b para K, em 14 solos do Rio Grande do Sul, variou entre 7 e 25 mmol cm⁻³ solo/mmol cm⁻³ solução (Ciprandi & Wiethölter, 1994). Usando os seguintes valores, aplicáveis à cultura do trigo:

$\alpha = 10^{-4}$ cm³ solução cm⁻² raiz s⁻¹; a = 0,06 cm (cilindro equivalente); $L_v = 3$ cm cm⁻³ de raiz no solo; t = 86.400 s (= 1 dia); $D_1 = 2 \times 10^{-5}$ cm² s⁻¹; $\theta = 0,4$ cm³ cm⁻³ de água no solo; $f = 3,1 \times 10^{1,9}$ (van Rees et al., 1990); e $x = 1/(\pi L_v)^{1/2} = 0,3257$ cm, obtêm-se os valores dos seguintes termos da equação (19): $2\pi\alpha L_v t = 9,7716$; $\alpha a/D_1 \theta f = 1,3797$; e $\ln(x/1,65a) = 1,1910$.

Com isso, o valor da parte exponencial da equação (19) para valores de b iguais a 7 e 25 será, respectivamente, 0,59 e 0,86. Os valores entre chaves da equação (19), em consequência, serão, para b = 7,

$$\text{Abs} = C \{1 - 0,59\} = C \times 0,41 \quad (20)$$

e para b = 25,

$$\text{Abs} = C \{1 - 0,86\} = C \times 0,14. \quad (21)$$

Assim, a taxa de absorção de K pela planta, ou de qualquer outro elemento cujo fluxo seja controlado por difusão, é diretamente proporcional ao valor de C (teor

adsorvido + teor na solução do solo) e inversamente proporcional ao poder-tampão (b). No caso específico de K, para um valor de b 3,6 vezes maior (25/7), a absorção seria reduzida em cerca de três vezes (0,41/0,14), ou seja, a redução da absorção (Abs) é quase linear com o aumento de b, o que demonstra a aplicabilidade do uso de b, em adição a C, como fator de decisão na adubação potássica. Na prática, no entanto, é comum representar o poder-tampão do solo (mmol cm⁻³ solo/mmol cm⁻³ solução) pela capacidade-tampão (kg de K₂O a aplicar por hectare para aumentar o teor no solo em 1 mg dm⁻³ de K no solo), permitindo a determinação da dose de fertilizante necessária para atingir o nível de suficiência. A quantidade total de K passível de ser absorvida pela planta depende da capacidade da fase sólida de reabastecer a solução do solo, que, conforme demonstrado por Beckett & Clement (1973), é função do quociente das atividades de K e dos cátions divalentes (equação 10). Ou seja, no conjunto, há dois fatores determinantes da absorção de K: (1) a taxa de difusão no solo (a dinâmica do fluxo, expressa pela equação 19); e (2) a capacidade do solo de reabastecer a solução do solo, caracterizada pela dinâmica das reações de troca expressas pela equação (10).

A aplicação prática dos princípios das equações (12) a (19) pode ser visualizada nas equações (22) e (23) e no quadro 4, cujos modelos foram derivados dos dados do quadro 2.

Interação entre teores de K trocável e argila do solo

O modelo matemático empírico de interação entre as doses de K₂O (x), o teor de K trocável do solo no estádio de antese do trigo (K) e o teor de argila do solo (Arg) foi o seguinte:

$$\hat{y} = 2927,78 + 11,30x - 16,48\text{Arg} - 0,0011Kx^2 + 0,0027\text{Arg}Kx \quad (R^2 = 0,66) \quad (22)$$

em que \hat{y} = rendimento de grãos de trigo (kg ha⁻¹); x = dose de K₂O (kg ha⁻¹); Arg = teor de argila do solo

Quadro 2. Rendimento de grãos de trigo em função de doses de K₂O

Experimento	K ₂ O (kg ha ⁻¹)					Média
	0	50	100	150	200	
	kg ha ⁻¹ de grãos					
1	2.578	4.478	4.812	4.991	4.887	4.349
2	2.466	2.996	3.182	3.133	3.122	2.980
3	861	1.938	1.951	2.391	2.431	1.914

Média de quatro repetições. CV = 4,4, 4,4 e 13,3 %, respectivamente, para os experimentos 1, 2 e 3.

(%); e K = teor de K trocável (Mehlich-1) (mg dm⁻³), representando o valor de C da equação (19). O teor de argila, nesse caso, está representando o poder-tampão do solo para K, pois a fração argila do solo é o fator geralmente mais estreitamente relacionado com o poder-tampão do solo. Diferenciando y em relação a x, obtém-se:

$$x = \frac{11,30 - RP + 0,0027ArgK}{0,0022K} \quad (23)$$

em que x passa a ser a dose de K₂O para máxima eficiência econômica (kg ha⁻¹) e RP = relação de preços (R\$ por kg K₂O/R\$ por kg grão de trigo). É comum o modelo de regressão quadrático superestimar a dose de máximo retorno, e este, também, é o caso das equações (22) e (23). No entanto, estas equações demonstram que o trigo cultivado em solos de mesmo teor de K, mas de teores diferentes de argila, necessitará de doses distintas de K para proporcionar o rendimento de grãos que conferirá retornos financeiros máximos. Assim, se a relação de preços (RP) fosse igual a 3 e se o valor de x da equação (23) fosse multiplicado por 0,7 (para reduzir a superestimação de x), obter-se-iam as doses de K₂O, em função dos teores de K e de argila do solo (Quadro 4).

A coluna da direita do quadro 4 constitui-se no sistema de recomendação mais adotado atualmente, ou seja, a dose é estabelecida somente em função do teor de K do solo. Contudo, conforme indicado, a dose de K₂O a aplicar para a cultura do trigo aumentou à medida que aumentou o teor de argila, o que é análogo à recomendação de P usualmente praticada nas regiões em que o teor desse elemento é extraído pelo método de Mehlich-1 e sua interpretação agrônômica associada ao teor de argila. Na média, para cada 10 % de incremento do teor de argila, aumentou a demanda de K₂O do solo em 8 ou 9 kg ha⁻¹, que é importante economicamente em termos de definição da adubação para situações específicas.

Aumentando o teor de argila, incrementa-se a capacidade de troca de cátions (CTC), o poder-tampão do solo (b) e a quantidade de água retida (θ) e diminui o teor na solução do solo (C_{li}). Segundo Gianello &

Mielniczuk (1981), a contribuição relativa do teor de argila e de água do solo é semelhante na absorção de K. Assim, considerando a tendência geral dos dados do quadro 4, verifica-se que eles vêm ao encontro do que prevê o modelo de Baldwin et al. (1973) [equações (12) a (21)], no sentido de que, aumentando-se o poder-tampão do solo, diminui a absorção de K pelas plantas. Em consequência, em solos com teor maior de argila, uma dose maior de K deveria ser aplicada, visando satisfazer a demanda das plantas, ou, em outros termos, o nível crítico de K no solo é maior à medida que aumenta o teor de argila do solo (Silva & Meurer, 1988). Dessa forma, para iguais teores de K trocável, o índice de disponibilidade de K é menor em solos de teor maior de argila. Essa constatação é análoga à observação de Khan & Fenton (1996), os quais verificaram que cada 1 % a mais de argila reduzia a disponibilidade de K em 5 mg dm⁻³.

De outra parte, os dados do quadro 4 indicam que, a partir do teor de K de 40 mg dm⁻³ de solo, começa a diminuir a dose de K a ser aplicada, para qualquer teor de argila. Dessa forma, em consonância com os dados obtidos para trigo e para várias outras culturas, o teor que poderia ser considerado como significativamente limitante ao desenvolvimento das culturas é de 40 mg dm⁻³, o que corrobora também as constatações de Borkert et al. (1993) e Brunetto et al. (2005). No entanto, em situações de déficit hídrico e em lavouras com alto potencial de rendimento definido por outros fatores que não o K, pode ocorrer deficiência desse elemento em solos com teores bem maiores que 40 mg dm⁻³ de K. Apesar de a atividade de K aumentar na solução do solo quando ocorre redução do teor de água, conforme indicado na equação (9), o processo de difusão é diminuído devido ao efeito do teor de água (θ) no fluxo de íons por difusão.

Analisando a equação (12), verifica-se que a absorção (Abs) é diretamente proporcional à concentração na solução do solo (C_{li}). Nos solos com teor maior de argila (b maior), cada unidade de K adicionada aumenta menos o valor de C_{li} do que nos arenosos. Assim, os dados do quadro 4 representam a base teórica da equação (19).

É importante destacar que os dados dos quadros 2, 3 e 4 indicam apenas o grau de resposta esperado com a cultura do trigo para diferentes teores de K e de argila dos solos estudados. Ainda deve ser ressaltado que a equação (22) foi obtida empregando-se os valores de quatro repetições dos tratamentos e com experimentos conduzidos em somente três solos e com amplitude de variação dos teores de argila de 40 a 63 %. Por isso, o quadro 4 constitui, nos valores baixos e altos de argila e de K no solo, apenas uma extensão do modelo. No entanto, a suposição básica do presente trabalho foi a existência de uma dependência da resposta do trigo a K em função do teor de argila dos solos, confirmada pela significância da interação entre Arg, K e x da equação (22).

CONCLUSÕES

1. Quanto maior o poder-tampão do solo em K, menor é a absorção de K pela planta prevista pelo modelo de Baldwin, ou seja, solos com poder-tampão de K maior necessitam adição de maior quantidade desse elemento para satisfazer a demanda da planta.
2. Um aumento de 3,6 vezes no valor do poder-tampão de K do solo significa redução da absorção de K de três vezes.
3. Houve interação significativa entre o rendimento de trigo, o teor de argila, o teor de K no solo e a dose de K para máxima eficiência econômica; quanto maior o

Quadro 3. Equações de regressão entre doses de K₂O e rendimento de grãos de trigo

Experimento	Equação de regressão	R ²	K ₂ O para MEE	K ₂ O para MET
			————— kg ha ⁻¹ —————	
1	$\hat{y} = 2728 + 34,1x - 0,120x^2$	0,90	129	142
2	$\hat{y} = 2502 + 10,4x - 0,038x^2$	0,74	98	137
3	$\hat{y} = 960 + 16,6x - 0,047x^2$	0,72	145	177

y: rendimento de grãos; x: dose de K₂O; MEE: dose de K₂O para obtenção da máxima eficiência econômica considerando a relação de preços (R\$ kg⁻¹ de K₂O dividido por R\$ kg⁻¹ de trigo) igual a 3; MET: máxima eficiência técnica, ou seja, dose necessária para obtenção de rendimento máximo.

Quadro 4. Doses de K₂O para máximo retorno econômico na cultura do trigo em função de teores de potássio e de argila do solo

Teor de K no solo	Teor de argila no solo (%)					Média
	20	30	40	50	60	
mg dm ⁻³	————— kg ha ⁻¹ de K ₂ O —————					
20	149	158	166	175	184	166
30	105	114	122	131	140	122
40	83	92	100	109	118	100
50	70	79	87	96	104	87
60	61	70	78	87	96	78
70	55	63	72	81	89	72
80	50	59	67	76	85	67
90	47	55	64	72	81	64
100	44	52	61	69	78	61
110	41	50	58	67	76	58
120	39	48	56	65	74	56
Média	68	76	85	93	102	85

teor de argila, maior foi a dose de K necessária para atingir certo rendimento.

4. Em média, para cada 10 % de aumento no teor de argila, a demanda de K do solo aumentou em 8 ou 9 kg ha⁻¹ de K₂O.

5. Para qualquer teor de argila, a partir do teor de K no solo de 40 mg dm⁻³, houve diminuição gradual da dose de K a ser aplicada, podendo essa concentração ser definida como nível mínimo de suficiência para o crescimento e o desenvolvimento de trigo sob condições de campo e sem déficit hídrico.

LITERATURA CITADA

- BALDWIN, J.P.; NYE, P.H. & TINKER, P.B. Uptake of solutes by multiple root systems from soil. III. A model for calculating the solute uptake by a randomly dispersed root system developing in a finite volume of soil. *Plant Soil*, 38:621-635, 1973.
- BARBER, S.A. A diffusion and mass-flow concept of soil nutrient availability. *Soil Sci.*, 93:39-49, 1962.
- BARBER, S.A. *Soil nutrient bioavailability: A mechanistic approach*. 2.ed. New York, John Wiley, 1995. 414p.
- BAYER, C. & MIELNICZUK, J. Características químicas do solo afetadas por métodos de preparo e sistemas de cultura. *R. Bras. Ci. Solo*, 21:105-112, 1997.
- BECKETT, P.H.T. & CLEMENT, C.R. K-activity ratios and the uptake of potassium by ryegrass in the field. *J. Soil Sci.*, 24:82-93, 1973.
- BORKERT, C.M.; SFREDO, G.J. & SILVA, D.N. Calibração de potássio trocável para soja em latossolo roxo distrófico. *R. Bras. Ci. Solo*, 17:223-226, 1993.
- BOULDIN, D.R. Mathematical description of diffusion processes in the soil plant system. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 25:476-480, 1961.
- BRAY, R.H. A nutrient mobility concept of soil-plant relationship. *Soil Sci.*, 78:9-22, 1954.
- BRUNETTO, G.; GATIBONI, L.C.; SANTOS, D.R.; SAGGIN, A. & KAMINSKI, J. Nível crítico e resposta das culturas ao potássio em um argissolo sob sistema plantio direto. *R. Bras. Ci. Solo*, 29:565-571, 2005.
- CARSLAW, H.S. & JAEGER, J.C. *Conduction of heat in solids*. Oxford, University Press, 1959. 510p.
- CIPRANDI, M.A.O. & WIETHÖLTER, S. Cation selectivity coefficients and diffusion parameters of potassium in soils of the State of Rio Grande do Sul, Brazil. *R. Bras. Ci. Solo*, 18:395-405, 1994.
- COREY, R.B. Soil test procedures: Correlation. In: BROWN, J.R. *Soil testing: Sampling, correlation, calibration, and interpretation*. Madison, Soil Science Society of America, 1987. p.15-22.
- ECKERT, D.J. Site-specific soil tests and interpretations for potassium. In: HAVLIN, J.L. & JACOBSEN, J.S., eds. *Soil testing: Prospects for improving nutrient recommendations*. Madison, ASA-SSSA, 1994. p.163-171. (SSSA. Special Publication, 40)
- FISHER, T.R. Some considerations for interpretation of soil tests for phosphorus and potassium. Columbia, University of Missouri/Agricultural Experiment Station, 1974. 36p.(Research Bulletin, 1007)
- GAPON, E.N. Theory of exchange adsorption in soils. *J. Gen. Chem.*, 3:144-163, 1933.
- GIANELLO, C. & MIELNICZUK, J. Características químicas e físicas de solo que afetam a absorção de potássio por plantas de milho. *R. Bras. Ci. Solo*, 5:109-114, 1981.
- KHAN, F.A. & FENTON, T.E. Factors affecting potassium status of alluvial-derived soils of Western Iowa. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 60:836-842, 1996.
- McLEAN, E.O. Exchangeable K levels for maximum crop yields on soils of different cation exchange capacities. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.*, 9:823-838, 1976.
- MEURER, E.J. & ANGHINONI, I. Disponibilidade de potássio e sua relação com parâmetros do solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 17:377-382, 1993.
- MIELNICZUK, J. Formas de potássio em solos do Brasil. *R. Bras. Ci. Solo*, 1:55-61, 1977.
- 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.
- NOVAIS, R.F. A pesquisa em fertilidade do solo no país – como a vejo e a sinto. In: ALVAREZ V., V.H.; FONTES, L.E.F. & FONTES, M.P.F. *O solo nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e o desenvolvimento sustentado*. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo/ Universidade Federal de Viçosa, 1996. p.399-409.
- PETERSON, G.A.; WESTFALL, D.G. & COLE, C.V. Agroecosystem approach to soil and crop management research. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 57:1354-1360, 1993.
- RAIJ, B. van; QUAGGIO, J.A. & SILVA, N.M. Extraction of phosphorus, potassium, calcium, and magnesium from soils by an ion-exchange resin procedure. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.*, 17:547-566, 1986.
- SAS Institute. *SAS/STAT® User's Guide*. Cary, Version 6, 1993. v.2. 1686p.
- SCHOFIELD, R.K. A ratio law governing the equilibrium of cations in the soil solution. In: International CONGRESS. *Congr. Pure Appl. Chem.*, 11., 1947. Proceedings. 1947. v.3. p.257-261.
- SHARPLEY, A.N.; SIMS, J.T. & PIERZYNSKI, G.M. Innovative soil phosphorus availability indices: Assessing inorganic phosphorus. In: HAVLIN, J.L. & JACOBSEN, J.S., eds. *Soil testing: Prospects for improving nutrient recommendations*. Madison, SSSA-ASA, 1994. p.115-142. (SSSA Special Publication, 40)
- SILVA, J.R.T. & MEURER, E.J. Disponibilidade de potássio para as plantas em solos do Rio Grande do Sul em função da capacidade de troca de cátions. *R. Bras. Ci. Solo*, 12:137-142, 1988.

- SKOGLEY, E.O. Reinventing soil testing for the future. In: HAVLIN, J.L. & JACOBSEN, J.S., eds. Soil testing: Prospects for improving nutrient recommendations. Madison, SSSA-ASA, 1994. p.187-201. (SSSA Special Publication, 40)
- SMETHURST, P.J. & COMERFORD, N.B. Simulating nutrient uptake by single, le or competing and contrasting root systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 57:1361-1367, 1993.
- SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO - COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO – SBCS/CQFS. Manual de adubação e de calagem para os solos dos estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina. 10.ed. Porto Alegre, 2004. 400p.
- TEDESCO, M.J.; CIANELLO, C.; BISSANI, C.A.; BOHNEN, H. & VOLKWEISS, S.J. Análises de solo, plantas e outros materiais. 2.ed. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174p.
- TINKER, P.B. & NYE, P.H. Solute movement in the rhizosphere. New York, Oxford University Press, 2000. 444p.
- van REES, K.C.J.; COMERFORD, N.B. & McFEE, W.W. Modeling potassium uptake by slash pine seedlings from low-potassium-supplying soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 54:1413-1421, 1990.
- WIETHÖLTER, S. Um modelo para avaliar a disponibilidade de nutrientes baseado em teoria de difusão. In: ROSAND, P.C., ed. Reciclagem de nutrientes e agricultura de baixos insumos nos trópicos. Ilhéus, CEPLAC/SBCS, 1985. p.103-148.
- WIETHÖLTER, S. & COREY, R.B. Effect of potassium addition to soil on potassium diffusion parameters predicted from strontium equilibration. *R. Bras. Ci. Solo*, 19:31-36, 1995.
- WIETHÖLTER, S. & COREY, R.B. Prediction of cation availability from soil equilibration with strontium. *R. Bras. Ci. Solo*, 18:381-386, 1994.