

MORFOLOGIA DE RAÍZES E CINÉTICA DE ABSORÇÃO DE POTÁSSIO EM GENÓTIPOS DE ARROZ IRRIGADO⁽¹⁾

Fernanda San Martins Sanes⁽²⁾, Rosa Maria Vargas Castilhos⁽³⁾, Walkyria Bueno Scivittaro⁽⁴⁾, Ledemar Carlos Vahl⁽³⁾ & Júlia Rodegheiro de Morais⁽⁵⁾

RESUMO

A eficiência de absorção de um nutriente pela planta é função de seus atributos morfológicos e fisiológicos, que podem variar entre cultivares da mesma espécie. Realizou-se um estudo para determinar os parâmetros morfológicos de raiz e os cinéticos de absorção de potássio (K), em genótipos de arroz irrigado. O experimento foi conduzido em vasos, em laboratório com luz artificial. Os tratamentos compreenderam 11 genótipos de arroz: cultivares Avaxi, BRS Atalanta, BRS Bojuru, BRS Fronteira e BRS Querência e as linhagens CNA 10754, CNA 10756, CNA 10757, BRA 1455, BRA 1024 e BRA 1073. As plantas foram cultivadas em solução nutritiva completa, renovada semanalmente, até o estágio vegetativo de sete folhas (V7), quando foram avaliados os parâmetros morfológicos de raiz (comprimento, raio médio, área radicular, massa úmida e massa seca). Os parâmetros cinéticos de absorção de K (influxo máximo - $I_{m\acute{a}x}$, constante de Michaelis-Mentem - K_m , e concentração mínima na solução para absorção - $C_{m\acute{i}n}$) também foram estimados. A quantidade de K acumulada pelos genótipos de arroz irrigado esteve diretamente relacionada ao comprimento e à área radicular e ao crescimento da parte aérea, que foram distintos entre os genótipos. Os parâmetros cinéticos de absorção ($I_{m\acute{a}x}$, K_m e $C_{m\acute{i}n}$) variaram entre os genótipos de arroz, distinguindo-os quanto à velocidade de absorção do nutriente por unidade de raiz. Considerando-se o influxo de K e a massa de matéria seca de raiz, os genótipos classificam-se em três grupos quanto ao potencial para aquisição do nutriente: maior potencial (BRS Atalanta, Avaxi, BRS Querência, BRA 1455 e BRA 1073); potencial intermediário (BRS Fronteira, BRA 1024 e CNA 10754); e menor potencial (CNA 10756, BRS Bojuru e CNA 10757).

Termos de indexação: comprimento de raiz, área radicular, influxo de K, *Oryza sativa* L.

⁽¹⁾ Parte da Dissertação de Mestrado do primeiro autor apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Área de Concentração Solos, Universidade Federal de Pelotas - UFPel. Recebido para publicação em 6 de setembro de 2011 e aprovado em 14 de abril de 2013.

⁽²⁾ Doutoranda do PPG em Sistemas de Produção Agrícola Familiar, UFPel. Bolsista CAPES. Campus Universitário, s/n. CEP 96010-900 Pelotas (RS). E-mail: fernandasanes@yahoo.com.br

⁽³⁾ Professor do Departamento de Solos da Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, UFPel. E-mail: rosamvc@ufpel.edu.br; levahl@ufpel.edu.br

⁽⁴⁾ Pesquisador, Embrapa Clima Temperado. E-mail: walkyria.scivittaro@cpact.embrapa.br

⁽⁵⁾ Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Agronomia - Solos, UFPel. E-mail: juliarodegheiro@yahoo.com.br

SUMMARY: ROOT MORPHOLOGY AND POTASSIUM UPTAKE KINETIC PARAMETERS IN IRRIGATED RICE GENOTYPES

The efficiency of uptake of a nutrient by plants is a function of their physiological and morphological properties, which may vary between cultivars of the same species. A study was carried out to determine root morphology and kinetic parameters of potassium (K) uptake in rice genotypes. The experiment was conducted in a laboratory and the plants cultivated in pots under artificial light. Treatments were represented by 11 rice genotypes (Avaxi, BRS Atalanta, BRS Bojuru, BRS Fronteira, BRS Querência, CNA 10754, CAN 10756, CNA 10757, BRA 1455, BRA 1024 and BRA 1073). Rice plants were grown in nutrient solution renewed every week, until the seven-leaf stage (V7) was reached, when root morphological parameters (length, mean radius, root area, wet weight, and dry weight) were evaluated. Potassium uptake kinetic parameters (maximum influx - I_{max} , Michaelis-Menten constant - K_m and minimum solution concentration for absorption - C_{min}) were also estimated. The amount of K accumulated by rice genotypes was directly related to the root area and to shoot growth, which differed among genotypes. The uptake kinetic parameters (I_{max} , K_m and C_{min}) varied between rice genotypes. The genotypes differed in K absorption rate per root unit. Considering the influx of K and root dry weight, the genotypes were classified into three groups of capacity of K acquisition: high potential (BRS Atalanta, Avaxi, BRS Querência, BRA 1455 and BRA 1073); intermediate potential (BRS Fronteira, BRA 1024 and CNA 10754) and low potential (CNA 10756, BRS Bojuru and CNA 10757).

Index terms: root length, root area, potassium influx, Oryza sativa L.

INTRODUÇÃO

A tecnificação do sistema de cultivo do arroz irrigado por inundação no sul do Brasil tem possibilitado o aumento do rendimento da cultura de forma consistente, especialmente na última década. Tal aumento decorre do uso de cultivares com alto potencial genético e de avanços técnicos no manejo da cultura, principalmente quanto à época e densidade de semeadura, época de irrigação e controle de plantas daninhas, doenças e pragas (SOSBAI, 2012). Adicionalmente, as doses recomendadas de fertilizantes contendo N, P e K para a cultura aumentaram da década passada para a atual. Enquanto as doses máximas recomendadas na década de 1990 eram de 90, 60 e 60 kg ha⁻¹ de N, P₂O₅ e K₂O (CQFS, 1995), as máximas recomendações atuais são de 150, 70 e 105 kg ha⁻¹ de N, P₂O₅ e K₂O, respectivamente (SOSBAI, 2012). Tendo como base os preços atuais dos fertilizantes, essas doses proporcionam retorno econômico com a cultura (SOSBAI, 2012); entretanto, a expectativa futura é que os aumentos nos custos dos fertilizantes sejam proporcionalmente maiores que os dos preços dos produtos agrícolas (Lemaire et al., 2008). Esse cenário, aliado à crescente e justificável preocupação com a poluição ambiental, direciona para uma agenda de agricultura moderna que tenha como uma das metas a maior eficiência de uso dos fertilizantes. Em referência ao uso de K para o arroz irrigado por alagamento, a eficiência da adubação potássica é extremamente baixa (menos de 49 %), quando se compara ao sistema de sequeiro (Bittencourt, 1999).

O uso de genótipos com maior eficiência nutricional, definida como a capacidade de um genótipo atingir

alto rendimento em solo com baixa disponibilidade de nutrientes (Rengel & Damon, 2008), pode ser uma estratégia para aumentar a eficiência do aproveitamento de fertilizantes, possibilitando redução nas atuais doses recomendadas. A alta eficiência nutricional de um genótipo pode resultar da maior eficiência interna de utilização (alta produção por unidade de nutriente contido na biomassa da planta) e, ou, da maior eficiência de aquisição de nutrientes do solo (alta absorção em solo com baixa disponibilidade) (Marschner, 1995; Rengel & Damon, 2008). A eficiência de aquisição de nutrientes do solo pela planta é controlada por mecanismos para os quais é importante o tamanho do sistema radicular, a solubilização de formas inicialmente não solúveis na rizosfera por ação das raízes e a fisiologia da absorção do nutriente da solução do solo pelas raízes (Samal et al., 2010).

Segundo Römheld & Kirkby (2010), a absorção de K pelo plasmalema das células das raízes é um processo altamente eficiente e não é considerada etapa limitante da aquisição do nutriente em solo com teores adequados do nutriente; todavia, em condições de baixa disponibilidade, genótipos eficientes podem aumentar a aquisição por meio de alterações morfológicas e, ou, fisiológicas no sistema radicular. Entre as alterações fisiológicas consta a eficiência de absorção por unidade de comprimento, superfície ou massa de raiz (Marschner, 1995). Assim, a eficiência da absorção em si pode ter contribuição importante na eficiência nutricional das plantas cultivadas em condições de baixa disponibilidade do nutriente no solo. Para o arroz irrigado por alagamento, é possível que o patamar de rendimento da cultura possa ser mantido com doses

de fertilizantes potássicos menores do que as atualmente recomendadas, utilizando-se genótipos mais eficientes na aquisição de K.

O modelo de Michaelis-Menten, que descreve a relação entre a velocidade de absorção e a concentração de nutriente na solução em contato com a superfície das raízes, tem sido amplamente utilizado em estudos de cinética de absorção para avaliar a eficiência de absorção de nutrientes por espécies e por genótipos de uma mesma espécie, a partir dos conceitos clássicos de $I_{m\acute{a}x}$, K_m e $C_{m\acute{i}n}$ (Nielsen & Barber, 1978; Glass & Perley, 1980; Vilela & Anghinoni, 1984; Siddiqi et al., 1987; Woodend et al., 1987; Malavolta et al., 1989; Vahl et al., 1993; Horn et al., 2006).

O $I_{m\acute{a}x}$ é o produto do número de transportadores do nutriente por unidade de área de plasmalema pela velocidade com que esses transportadores funcionam nessa membrana, enquanto o K_m é o inverso da afinidade do transportador pelo nutriente (Epstein & Bloom, 2006) e equivale à concentração do nutriente na solução relacionada a um influxo igual à metade do $I_{m\acute{a}x}$. O $C_{m\acute{i}n}$ é a concentração mínima necessária para que a raiz comece a absorver o nutriente (Barber, 1995).

Em princípio, de acordo com o modelo de Michaelis-Menten, um genótipo que tenha alto $I_{m\acute{a}x}$ e baixos K_m e $C_{m\acute{i}n}$ deve absorver mais nutriente do que outro que tenha baixo $I_{m\acute{a}x}$ e altos K_m e $C_{m\acute{i}n}$, quando ambos são submetidos a uma solução com baixa concentração de nutriente. Nesse caso, o primeiro genótipo seria considerado mais eficiente do que o segundo. Entretanto, frequentemente, ocorre que um genótipo pode ter ambos, $I_{m\acute{a}x}$ e K_m , altos ou baixos, o que torna as comparações de eficiência complexas, usando esses parâmetros isoladamente. O conceito de poder de absorção (α), que é a razão entre $I_{m\acute{a}x}$ e K_m ($\alpha = I_{m\acute{a}x}/K_m$), concilia os efeitos desses dois parâmetros na eficiência de absorção e se aplica para concentrações muito baixas do nutriente em solução (muito inferiores a K_m e próximas de $C_{m\acute{i}n}$) (Nye & Tinker, 2000). Desse modo, o α pode ser considerado como a eficiência de absorção específica, conforme denominação dada por Marschner (1995): quanto maior for o α , maior será a taxa de absorção por unidade de raiz.

Anghinoni et al. (1989) e Vahl et al. (1993) observaram diferença no poder de absorção (α) de nutrientes entre cultivares de arroz irrigado e, também, no desenvolvimento do sistema radicular. Entretanto, deve-se ressaltar que dentre os cultivares estudados por esses autores, apenas dois ainda são cultivadas no Rio Grande do Sul e Santa Catarina (BR-IRGA 409 e BR-IRGA 410), sendo a atual relação de cultivares recomendados para esses Estados bem mais ampla (SOSBAI, 2012).

O objetivo deste trabalho foi avaliar a variabilidade na eficiência de aquisição de K entre alguns genótipos de arroz irrigado em uso no Rio Grande do Sul ou em avaliação nos programas de melhoramento genético da cultura em órgãos de

pesquisa, analisando-se os parâmetros cinéticos de absorção do nutriente e os morfológicos de raiz. A identificação de possíveis diferenças entre genótipos poderá subsidiar recomendações diferenciais desses para cultivo em solos com níveis distintos de disponibilidade de K.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado na Universidade Federal de Pelotas, no Laboratório de Nutrição e Adubação de Plantas do Departamento de Solos da Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, com as plantas cultivadas em vasos dispostos em bancadas. O fotoperíodo de 12 h foi proporcionado com luz artificial (15.000 lx), por meio de 45 lâmpadas amarelas de 100 W e 45 lâmpadas fluorescentes de 40 W, distribuídas alternadamente e dispostas a uma altura de 80 cm da borda superior dos vasos. As temperaturas diurnas foram de 27 ± 2 °C e as noturnas, de 22 ± 2 °C, medidas na superfície dos vasos.

Os tratamentos compreenderam de 11 genótipos de arroz irrigado (cinco cultivares comerciais: híbrido Avaxi, BRS Atalanta, BRS Bojuru, BRS Fronteira e BRS Querência e seis linhagens promissoras do programa de melhoramento genético de arroz da Embrapa: CNA 10754, CNA 10756, CNA 10757, BRA 1455, BRA 1024 e BRA 1073), sendo dispostos em delineamento inteiramente ao acaso, com três repetições. O híbrido Avaxi foi fornecido pela Empresa RiceTec Sementes Ltda e os demais cultivares, pela Embrapa. Todos os genótipos são do tipo moderno, com exceção de BRS Bojuru, que apresenta tipo de planta intermediário. Apenas BRS Atalanta é de ciclo muito precoce; Avaxi e BRS Querência são de ciclo precoce e os demais, de ciclo médio. Destaca-se, entre os genótipos, o elevado potencial de desenvolvimento do sistema radicular e da parte aérea do híbrido Avaxi.

As sementes foram pré-geminadas e, após sete dias, três plântulas de cada genótipo foram transplantadas para vasos plásticos contendo 3,8 L de solução nutritiva completa, onde foram cultivadas até o estágio vegetativo de sete folhas (V7) (Counce et al., 2000). Durante a medição dos parâmetros cinéticos, foi instalado um sistema de aeração para a homogeneização da solução.

A composição da solução nutritiva ($\mu\text{mol L}^{-1}$) foi: 1.000 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$; 1.000 KCl; 322 $(\text{NH}_4)_2\text{PO}_4$; 660 MgSO_4 ; 250 CaCl_2 ; 350 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$; 15 H_3BO_3 ; 0,8 CuSO_4 ; 38 $\text{C}_{10}\text{H}_{15}\text{N}_2\text{Fe}_2\text{O}_8$; 1,2 MnCl_2 ; 0,51 ZnSO_4 ; e 0,012 $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}$. Durante o período de cultivo, o nível de solução nos vasos foi mantido por meio de adição diária de água destilada. O pH foi monitorado a cada três dias e, quando necessário, ajustado para 5,7 ($\pm 0,3$), utilizando-se NaOH ou HCl. As soluções nutritivas dos vasos foram renovadas semanalmente.

Quando os genótipos atingiram o estágio de sete folhas (V7), determinaram-se os parâmetros cinéticos de absorção de K: influxo máximo de absorção ($I_{\text{máx}}$), constante de Michaelis-Menten (K_m) e concentração mínima abaixo da qual as plantas deixam de absorver o nutriente ($C_{\text{mín}}$), a partir da diminuição da concentração do elemento na solução nutritiva em função do tempo, conforme método proposto por Claassen & Barber (1974).

Na véspera da medição da cinética de absorção de K, as plantas foram transferidas para vasos menores (1,6 L), substituiu-se a solução por outra com omissão de K e instalou-se o sistema de aeração nos vasos. Na manhã seguinte, adicionaram-se 100 μmol de K por vaso e, imediatamente após, coletou-se uma alíquota de 10 mL de solução, para medida da real concentração inicial de K, que foi utilizada no cálculo das curvas de depleção. A partir desse momento, a cada 30 min, foram retiradas alíquotas de mesmo volume de solução até a exaustão do K. O nutriente foi exaurido em um período de 6 a 14 h, de acordo com o genótipo. Durante as coletas, o volume de solução retirado para análise era repostado pela adição de água destilada. Os teores de K nas alíquotas de solução foram determinados por leitura direta no fotômetro de chama (Tedesco et al., 1995). Para o cálculo de $I_{\text{máx}}$, K_m e $C_{\text{mín}}$, utilizou-se o programa Cinética (Ruiz & Fernandes Filho, 1992).

A velocidade de absorção de K ou influxo (I) foi calculada conforme Claassen & Barber (1974), pela equação: I ($\mu\text{mol g}^{-1} \text{L}^{-1}$) = $[I_{\text{máx}} \times (\text{concentração K} - C_{\text{mín}})] / K_m + (\text{concentração K} - C_{\text{mín}})$. O poder de absorção (α) foi calculado pela razão $\alpha = I_{\text{máx}} / K_m$.

Após a medição dos parâmetros cinéticos, as plantas foram coletadas e a parte aérea separada das raízes. Nas raízes, foram determinados os parâmetros morfológicos: comprimento (L), raio médio (r), área radicular (AR), massa úmida (μ) e massa de matéria seca (ms). O comprimento de raízes foi estimado pelo método de intersecção das quadrículas descrito por Tennant (1975), considerando-se todo o sistema radicular. O raio médio das raízes foi calculado pela relação $[r = (\mu / \pi L)^{1/2}]$ e a área radicular, pela fórmula $[AR = 2\pi rL]$, em que r significa raio; μ , a massa úmida; e L, comprimento das raízes.

Para a determinação da massa de matéria seca, o material vegetal referente à parte aérea e às raízes das plantas foi seco em estufa com circulação forçada de ar (65 °C) até massa constante. Após, a parte aérea foi moída para a quantificação dos teores de K, conforme método descrito em Tedesco et al. (1995).

Os resultados foram submetidos à análise de variância e, quando significativa, foi aplicado o teste de Duncan a 5 %, para a comparação entre genótipos. Adicionalmente, foram realizadas análises de correlação entre algumas variáveis, utilizando o sistema de Análise Estatística Winstat (Machado, 2001).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Parâmetros morfológicos e absorção de K

Os genótipos Avaxi e CNA 10756 apresentaram as maiores massas de matéria seca da parte aérea, destacando-se em relação aos demais. A menor massa foi observada para o genótipo BRSBojuru, que não diferiu de BRS Fronteira e BRS Altalanta; os demais genótipos apresentaram desempenho intermediário (Quadro 1). Esses resultados podem ser explicados pela variabilidade genética dos genótipos avaliados, como as folhas mais estreitas de BRS Bojuru, em comparação aos demais; e o maior porte, com grande capacidade de perfilhamento e produção de massa de matéria seca, do híbrido Avaxi (SOSBAI, 2010).

Os genótipos que apresentaram maiores massas de matéria seca de raízes foram Avaxi, BRA 1455 e BRS Querência. A massa de raízes do Avaxi foi cerca de duas vezes maior do que a dos genótipos menos produtivos (BRS Bojuru, CNA 10756 e CNA 10757) (Quadro 1).

As diferenças entre as massas de matéria secas de raízes e partes aéreas dos genótipos refletiram nas variações das relações entre as massas de matéria secas de raízes e das partes aéreas, reforçando as diferenças entre genótipos de arroz quanto aos parâmetros de crescimento de planta (Quadro 1).

A maior relação raiz/parte aérea reflete a capacidade genética de algumas plantas em desenvolver um sistema radicular adaptado a condições de estresse ou com características favoráveis à absorção de água e de sais minerais, evidenciando que a absorção e utilização de dado elemento não dependem apenas dos parâmetros fisiológicos, mas

Quadro 1. Massa de matéria seca (MS) da parte aérea e das raízes e relação entre MS raízes e parte aérea de 11 genótipos de arroz irrigado

Genótipo	Matéria seca		Relação $MS_{\text{raízes}}/MS_{\text{parte aérea}}$
	Parte aérea	Raízes	
g/vaso			
Avaxi	3,869 a	0,963 a	0,249 abc
BRA 1024	2,755 bcd	0,569 cd	0,206 bc
BRA 1073	2,685 cd	0,652 bcd	0,243 abc
BRA 1455	2,532 d	0,813 ab	0,321 a
BRS Atalanta	2,438 de	0,565 cd	0,232 abc
BRS Bojuru	1,948 e	0,427 d	0,219 bc
BRS Fronteira	2,434 de	0,629 bcd	0,258 ab
BRS Querência	3,258 b	0,760 abc	0,233 abc
CNA 10754	2,730 bcd	0,593 bcd	0,217 bc
CNA 10756	3,805 a	0,486 d	0,128 bc
CNA 10757	3,200 bc	0,488 d	0,152 bc
CV (%)	10,4	19,2	20,8

Médias seguidas de mesma letra, nas colunas, não diferem significativamente entre si pelo teste de Duncan ($p < 0,05$).

também de parâmetros morfológicos. Assim como reportado por diversos autores (Baptista et al., 2000; Horn et al., 2006), a determinação da relação raiz/parte aérea auxilia na compreensão de possíveis diferenças entre cultivares de arroz quanto à absorção de K e de outros nutrientes.

Quanto à morfologia radicular, embora não diferindo estatisticamente do CNA10757, o genótipo Avaxi apresentou comprimento radicular 25 % maior do que o CNA 10757 e, pelo menos, o dobro que o restante dos genótipos (Quadro 2). Os genótipos Avaxi e CNA 10757 também apresentaram as maiores áreas radiculares (Quadro 2), o que pode indicar maior potencial para absorção de nutrientes. O maior comprimento do sistema radicular é indicativo de maior volume ocupado e explorado pelas raízes no solo (Zonta et al., 2006) e genótipos com maior comprimento radicular proporcionam maior absorção de nutrientes, uma vez que as raízes atingem maiores profundidades no solo (Clarkson, 1985; Alves et al., 2002).

Os genótipos CNA 10757 e Avaxi, embora tenham apresentado raízes mais finas, proporcionaram área radicular elevada, decorrente do elevado comprimento radicular. Os demais genótipos, embora tenham diferido significativamente quanto ao raio de raízes, não se distinguiram quanto à área radicular, cujo comportamento refletiu a tendência observada para o comprimento de raízes. Resultados semelhantes foram encontrados por Pinto (2009), para clones de eucalipto, em que as diferenças na morfologia radicular entre os genótipos foram determinantes para a absorção de nutrientes. A área radicular torna-se parâmetro importante na absorção do nutriente K, cujo principal mecanismo de movimento do íon para a raiz é a difusão, uma vez que a taxa de difusão é diretamente proporcional à superfície de raízes (Vilela & Anghinoni, 1984; Barber, 1995).

A concentração de K na parte aérea das plantas variou de 29,42 a 43,75 g kg⁻¹, possibilitando a classificação dos cultivares em dois grupos distintos: Avaxi, BRA 1024, BRS Querência, CNA 10754, CNA 10756 e CNA 10757, com concentração média de K de 42 g kg⁻¹; e BRA 1073, BRA 1455, BRS Atalanta, BRS Bojuru e BRS Fronteira, com 31 g kg⁻¹ (Quadro 3). Apesar dessas diferenças entre os genótipos, pode-se considerar que todos estavam bem nutridos em relação ao K, uma vez que a faixa de suficiência de K na parte aérea de plantas de arroz irrigado na metade do perfilhamento (estádio vegetativo de seis a sete folhas) foi de 24,9 a 42,5 g kg⁻¹ (Reuter & Robinson, 1997). Esse resultado é explicado pelo fato de o arroz ter sido cultivado em solução nutritiva completa, que foi renovada semanalmente para evitar qualquer deficiência nutricional. Teores de K semelhantes foram reportados por Gargantini & Blanco (1965), em estudo de marcha de absorção de nutrientes essenciais pela cultura do arroz, em que plantas entre 30 e 40 dias apresentaram na parte aérea teores de K entre 30 e 49 g kg⁻¹.

O grupo de genótipos com a maior concentração de K no tecido vegetal apresentou também as maiores quantidades do nutriente acumulado na parte aérea; Avaxi e CNA 10756 apresentaram os maiores valores de K acumulado, diferenciando-se de CNA 10754. No grupo de genótipos com menor concentração de K no tecido vegetal, o comportamento foi semelhante, ou seja, esse grupo apresentou as menores quantidades de K acumulado. O maior acúmulo de K em Avaxi, BRS Querência, CNA10756 e CNA 10757 é atribuído ao fato de esses genótipos terem apresentado maior massa de matéria seca da parte aérea (Quadro 1) e, também, aos maiores comprimento e área radicular (Quadro 2), evidenciando que genótipos com maior

Quadro 2. Comprimento (L), raio médio (r) e área radicular (AR) de genótipos de arroz irrigado

Genótipo	L	r	AR
	cm	x 10 ⁻² cm	cm ²
Avaxi	16539 a	1,62 bc	1366 a
BRA 1024	7215 b	1,97 abc	862 b
BRA 1073	5662 b	2,47 a	815 b
BRA 1455	6419 b	2,24 ab	846 b
BRS Atalanta	7043 b	2,03 abc	676 b
BRS Bojuru	6045 b	2,17 ab	751 b
BRS Fronteira	8870 b	1,62 bc	897 ab
BRS Querência	7355 b	2,44 a	1104 ab
CNA 10754	6412 b	2,27 ab	914 ab
CNA 10756	7357 b	1,60 bc	700 b
CNA 10757	13202 ab	1,41 c	1155 ab
CV (%)	50,1	18,9	28,4

Médias seguidas de mesma letra, nas colunas, não diferem significativamente entre si pelo teste de Duncan (p<0,05).

Quadro 3. Teor e quantidade de potássio acumulado na parte aérea de genótipos de arroz irrigado

Genótipo	Teor de K	K acumulado
	g kg ⁻¹	g/vaso
Avaxi	40,22 a	155,84 a
BRA 1024	42,43 a	116,95 b
BRA 1073	29,42 b	79,07 c
BRA 1455	31,16 b	79,06 c
BRS Atalanta	32,06 b	78,28 c
BRS Bojuru	31,16 b	60,35 c
BRS Fronteira	31,38 b	76,22 c
BRS Querência	43,22 a	141,57 ab
CNA 10754	43,75 a	119,65 b
CNA 10756	41,98 a	159,33 a
CNA 10757	42,60 a	136,33 ab
CV (%)	6,79	13,97

Médias seguidas de mesma letra, na coluna, não diferem significativamente entre si pelo teste de Duncan (p<0,05).

crescimento, tanto da parte aérea quanto das raízes, poderão absorver maior quantidade de K.

Os resultados de crescimento radicular e de absorção de K, de forma geral, concordam com aquele descrito por Baptista et al. (2000), os quais constataram que cultivares de arroz com maior área radicular apresentam maior massa de matéria seca e conteúdo de N na parte aérea. No entanto, em outro estudo relativo à avaliação do desenvolvimento radicular e influxo de N, realizado com os cultivares de arroz IAC 4440 e Comum Branco, foi observado que a maior massa de matéria seca da parte aérea não influenciou a absorção total de N pelas plantas (França et al., 1999).

Neste estudo, com exceção do genótipo CNA 10756, todos os demais apresentaram correlação significativa ($p < 0,01$) entre a área radicular e o conteúdo de K na parte aérea ($r = 0,88$), assim como correlações positivas entre a massa de matéria seca da parte aérea e os parâmetros radiculares área e comprimento, que apresentaram de significância de 1% ($r = 0,925$) e 5% ($r = 0,784$), respectivamente. Também foi significativa ($p < 0,01$) a correlação entre K acumulado na parte aérea e a matéria seca da parte aérea ($r = 0,932$), indicando que a absorção foi influenciada pelo crescimento da planta inteira (parte aérea e raízes), ou seja, o maior crescimento da parte aérea e a maior superfície radicular resultaram em maior absorção de K (Figura 1).

Resultados semelhantes aos deste trabalho foram obtidos por Abichequer (2004), que observou para cinco cultivares de arroz correlação significativa entre comprimento de raízes e o conteúdo de K ($r = 0,63$), na parte aérea. Diferenças entre genótipos de diversas culturas como soja, milho e arroz no tocante às características morfológicas de raiz foram reportadas por vários autores, como Anghinoni et al. (1989); Horn et al. (2006); Alves et al. (2002); França et al., (1999); e Martins (2010).

Parâmetros cinéticos

Os valores dos parâmetros cinéticos ($I_{m\acute{a}x}$, K_m , $C_{m\acute{i}n}$) e de poder de absorção de K (α) variaram entre os genótipos de arroz (Quadro 4). Comportamento semelhante foi verificado por Baptista et al. (2000); França et al. (1999); e Martins (2010).

Considerando que $I_{m\acute{a}x}$ é definido como o produto do número de sítios de absorção por unidade de raiz e sua velocidade de funcionamento (Epstein, 2006), o cultivar BRS Atalanta, que apresentou maior $I_{m\acute{a}x}$ (Quadro 4), teria maior concentração de sítios de absorção por unidade de raiz que os demais genótipos, o que pode ser indicativo de maior potencial de absorção, sob nível alto de K em solução.

Resultados semelhantes foram encontrados por Baptista et al. (2000) para os cultivares de arroz Agulha e Bico Ganga; entretanto, o cultivar que

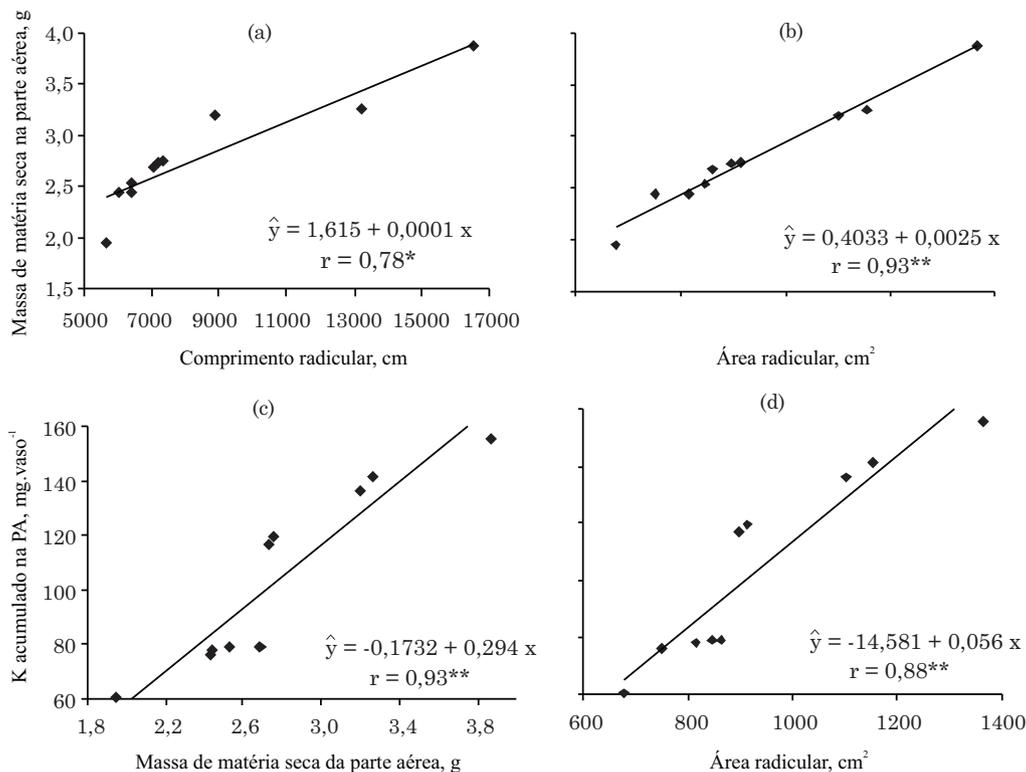


Figura 1. Correlações entre a massa de matéria seca (MS) da parte aérea (PA) e o comprimento de raiz (a); MS da PA e área radicular (b); quantidade de potássio acumulado na PA e MS da PA (c); e quantidade de potássio acumulado na PA e área radicular (d) de genótipos de arroz irrigado. ** e *: significativo a 1 e 5 %, respectivamente.

apresentou valor menor de $I_{m\acute{a}x}$, foi menos eficiente na absorção de nutrientes. No trabalho desses autores, foi constatado, ainda, que, sob mesma condição de disponibilidade de nutrientes, cultivares da uma mesma espécie podem apresentar comportamento distinto quanto à eficiência de absorção de nutrientes.

O valor de K_m indica a concentração em que metade da velocidade máxima de absorção é atingida, ou seja, quanto maior o K_m , menor a afinidade do elemento com os sítios de absorção (Fernandes & Souza, 2006). Os maiores valores de K_m foram encontrados para os genótipos BRA 1455 e BRS Atalanta, sendo, pelo menos, o dobro dos encontrados para os demais genótipos (Quadro 4), indicando que, sob baixas concentrações de K em solução, BRA 1455 e BRS Atalanta são os menos eficientes na absorção do nutriente.

Ao contrário do encontrado neste trabalho, Vahl et al. (1993) não observaram diferenças nos valores de K_m para K entre cultivares de arroz irrigado. No entanto, Anghinoni et al. (1989) e Baptista et al. (2000) observaram diferenças entre cultivares de arroz para os nutrientes K e N, respectivamente. A variação nos valores de K_m obtida por esses autores, para K, foi similar à encontrada neste trabalho, embora os genótipos de arroz utilizados sejam distintos.

O $C_{m\acute{i}n}$ variou pouco entre os genótipos de arroz, com valores menores para BRS Atalanta e BRS Querência, em comparação ao BRA 1455, significando que os dois primeiros seriam mais adaptados a ambientes com menor disponibilidade de K (Quadro 4). Diferenças no $C_{m\acute{i}n}$ entre genótipos de arroz foram também obtidas em trabalhos com N (Baptista et al., 2000) e Si (Martins, 2010), em que o cultivar com menor $C_{m\acute{i}n}$ foi considerado mais adaptado a ambientes adversos. Entretanto, Vahl et al. (1993) não observaram diferenças entre cultivares de arroz irrigado nos valores de $C_{m\acute{i}n}$ para K.

Para melhor interpretação dos parâmetros cinéticos, é importante a avaliação conjunta desses, associando-se, para um mesmo genótipo, características desejáveis para altas taxas de absorção, especialmente em ambientes de baixa fertilidade. O poder de absorção (α), dado pela razão entre $I_{m\acute{a}x}$ e K_m , reflete o efeito conjunto desses dois fatores, ou seja, quanto maior o $I_{m\acute{a}x}$ e menor o K_m , maior é o poder de absorção por unidade de massa de raiz. O genótipo CNA 10756 obteve maior valor absoluto de α , não diferindo de BRS Bojuru, BRA 1024, BRS Fronteira e BRA 1073, indicando que esses teriam maior poder de absorção de K que os demais, em condições de baixa disponibilidade do nutriente. O genótipo BRA 1455 apresentou o menor valor de α , não diferindo, apenas, do cultivar BRS Atalanta, o que sugeriu que ambos teriam menor potencial de absorção de K, em condições de baixa disponibilidade do nutriente. O comportamento diferenciado entre genótipos de arroz é explicado preponderantemente pela variação do K_m ,

relativamente ao $I_{m\acute{a}x}$, uma vez que os valores de $I_{m\acute{a}x}$, excetuando-se o cultivar BRS Atalanta, foram similares para os demais genótipos testados (Quadro 4).

A aplicação dos valores de $I_{m\acute{a}x}$, K_m e $C_{m\acute{i}n}$ (Quadro 4) na equação de Michaelis-Menten, modificada por Claassen & Barber (1974), originou as taxas de absorção de K (influxo) em razão de sua concentração em solução (Figura 2) e permitiu classificar os genótipos quanto à eficiência de absorção de K por unidade de raiz. Para concentrações de K em solução superiores a $20 \mu\text{mol L}^{-1}$, BRS Atalanta destacou-se em relação aos demais, compondo o primeiro grupo de genótipos com maior taxa de absorção do nutriente por unidade de raiz, provavelmente decorrente do alto

Quadro 4. Parâmetros cinéticos $I_{m\acute{a}x}$, K_m e $C_{m\acute{i}n}$ e poder de absorção ($\alpha = I_{m\acute{a}x}/K_m$) de genótipos de arroz irrigado

Genótipo	$I_{m\acute{a}x}$	K_m	$C_{m\acute{i}n}$	α
	$\mu\text{mol g}^{-1} \text{h}^{-1}$	$\mu\text{mol L}^{-1}$	$\mu\text{mol L}^{-1}$	
Avaxi	36,36 b	8,13 b	1,05 ab	4,61 cd
BRA 1024	41,53 b	6,77 b	1,08 ab	6,43 abc
BRA 1073	43,51 b	7,66 b	1,54 ab	5,72 abcd
BRA 1455	40,75 b	20,17 a	1,89 a	2,14 e
BRS Atalanta	66,42 a	20,39 a	0,92 b	3,32 de
BRS Bojuru	36,89 b	4,61 b	1,20 ab	7,97 ab
BRS Fronteira	34,07 b	5,65 b	1,25 ab	6,34 abc
BRS Querência	42,14 b	8,56 b	0,90 b	4,92 cd
CNA 10754	42,62 b	8,34 b	1,42 ab	5,37 bcd
CNA 10756	36,96 b	4,71 b	0,97 ab	8,10 a
CNA 10757	35,42 b	7,83 b	1,17 ab	4,52 cd
CV (%)	16,2	32,6	43,1	25,0

$I_{m\acute{a}x}$: velocidade máxima de absorção; K_m : concentração para metade da velocidade máxima; e $C_{m\acute{i}n}$: concentração mínima para absorção. Médias seguidas de mesma letra, na coluna, não diferem significativamente entre si pelo teste de Duncan ($p < 0,05$).

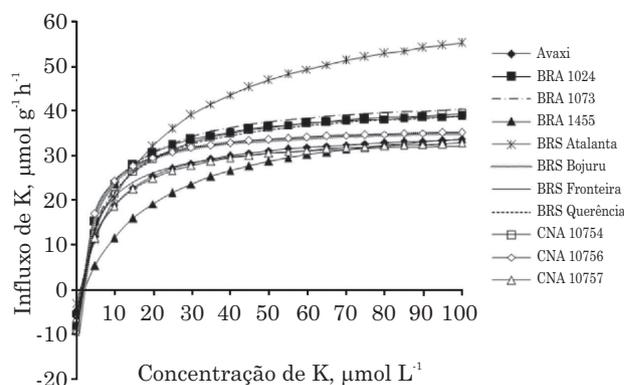


Figura 2. Influxo de potássio em função da concentração de K na solução de 11 genótipos de arroz irrigado.

valor de $I_{m\acute{a}x}$. Os genótipos BRA 1024, BRA 1073, BRS Querência, BRS Bojuru, CNA 10756 e CNA 10754 apresentaram comportamento similar entre si, com taxa de absorção intermediária; os demais genótipos compuseram um terceiro grupo, com menor taxa de absorção por unidade de raiz (Figura 2). Em concentrações baixas de K em solução (<20 $\mu\text{mol L}^{-1}$), houve inversão no comportamento de alguns genótipos; BRS Atalanta não foi o genótipo com maior taxa de absorção, sendo superado por BRS Bojuru, CNA 10756, BRA 1024 e BRA 1073. Isto pode ser explicado pelo fato de BRS Atalanta apresentar valor de K_m alto, tornando-o menos eficiente na absorção de K em baixas concentrações do nutriente no meio de cultivo, em relação a esses genótipos (Quadro 4).

Como o influxo representa a taxa de absorção por unidade de raiz, na aquisição de determinada quantidade de nutriente, o influxo radicular de uma espécie ou variedade, quando baixo, pode ser compensado pelo maior desenvolvimento de seu sistema radicular. Para as taxas de absorção dos diferentes genótipos, calculadas em uma concentração fixa de K em solução, como 90 $\mu\text{mol L}^{-1}$, foi estimada a absorção total de K pelas plantas (Quadro 5), levando-se em conta a massa de matéria seca das raízes (Quadro 1).

Entre os genótipos avaliados, Avaxi e BRS Querência, com menores influxos, equipararam-se ao BRS Atalanta, quanto à absorção total de K, demonstrando que houve compensação pelo maior crescimento de raiz. Da mesma forma, os genótipos BRA 1073 e BRA 1455, com produções elevadas de matéria seca de raiz, também apresentaram efeito compensatório, resultando em aumento do acúmulo de K. Resultados semelhantes foram relatados por França et al. (1999), em estudo relativo ao influxo de N em cultivares de arroz, que não diferiram quanto à acumulação do nutriente, pelo fato de terem evidenciado crescimento radicular distinto.

Quadro 5. Influxo de potássio (K) e K total absorvido estimados para a concentração na solução de 90 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de K para genótipos de arroz irrigado

Genótipo	Taxa de absorção de K	K total absorvido
	$\mu\text{mol g}^{-1} \text{h}^{-1}$	$\mu\text{mol h}^{-1}/\text{vaso}$
Avaxi	33,32	32,08
BRA 1024	38,59	21,94
BRA 1073	40,04	26,09
BRA 1455	33,13	26,92
BRS Atalanta	54,05	30,52
BRS Bojuru	35,07	14,96
BRS Fronteira	32,03	20,14
BRS Querência	38,45	29,22
CNA 10754	38,95	23,10
CNA 10756	35,10	17,06
CNA 10757	32,55	15,87

Levando-se em conta as variáveis velocidade de absorção por unidade de raiz (influxo) e matéria seca de raiz, a aquisição total de K, calculada para concentração fixa de K em solução, permitiu rearranjar os grupos de cultivares da seguinte forma: genótipos com maior absorção de K (BRS Atalanta, Avaxi, BRS Querência, BRA 1455 e BRA 1073); genótipos com absorção intermediária (BRS Fronteira, BRA 1024 e CNA 10754); e genótipos com menor potencial para aquisição de K (CNA 10756, BRA Bojuru e CNA 10757).

CONCLUSÕES

1. A morfologia de raízes e os parâmetros cinéticos de absorção de K variam entre os genótipos de arroz avaliados (Avaxi, BRS Atalanta, BRS Bojuru, BRS Fronteira, BRS Querência, CNA 10754, CNA 10756, CNA 10757, BRA 1455, BRA 1024 e BRA 1073), permitindo distingui-los quanto à velocidade de absorção do nutriente por unidade de raiz.

2. Os genótipos classificam-se em três grupos, quanto ao potencial para aquisição do nutriente: maior potencial (BRS Atalanta, Avaxi, BRS Querência, BRA 1455 e BRA 1073); potencial intermediário (BRS Fronteira, BRA 1024 e CNA 10754); e menor potencial (CNA 10756, BRS Bojuru e CNA 10757), considerando-se o influxo de K e a massa de matéria seca de raiz.

LITERATURA CITADA

- ABICHEQUER, A.D. Morfologia e distribuição de raízes de arroz irrigado por inundação e sua relação com a absorção de nutrientes e o rendimento de grãos. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004. 56p. (Tese de Doutorado)
- ALVES, V.M.C.; PARENTONI, S.N.; VASCONCELLOS, C.A.; PITTA, G.V.E. & FRANÇA, C.C.M. Cinética de absorção de fósforo e crescimento do sistema radicular de genótipos de milho contrastantes para a eficiência a fósforo. R. Bras. Milho Sorgo, 1:85-92, 2002.
- ANGHINONI, I.; VOLKART, C.R.; FATTORE, N. & ERNANI, P.R. Morfologia de raízes e cinética da absorção de nutrientes em diversas espécies e cultivares de plantas. R. Bras. Ci. Solo, 13:355-361, 1989.
- BARBER, S.A. Soil nutrient bioavailability: A mechanistic approach. 2.ed. New York, John Wiley, 1995. 414p.
- BAPTISTA, J.A.; FERNANDES, M.S. & SOUZA, S.R. Cinética de absorção de amônio e crescimento radicular das cultivares de arroz Agulha e Bico Ganga. Pesq. Agropec. Bras., 35:1325-1330, 2000.
- BITTENCOURT, A. Propriedades químicas de um Planossolo após doze anos de cultivo sob diferentes sistemas. Pelotas, Universidade Federal de Pelotas, 1999. 40p. (Dissertação de Mestrado)

- CLAASSEN, N. & BARBER, S.A. A method for characterizing the relation between nutrient concentration and influx into roots of intact plants. *Plant Physiol.*, 54:564-568, 1974
- CLARKSON, D.T. Factors affecting mineral nutrient acquisition by plants. *Ann. Rev. Plant Physiol.*, 36:77-115, 1985.
- COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO - CQFS. Manual de adubação e de calagem para os Estados do RS e SC. 3ed. Porto Alegre, Sociedade Brasileira de Ciência do solo/Núcleo Regional Sul, 1995. 223p.
- COUNCE, P.A.; KEISLING, T.C. & MITCHELL, A.J. A uniform objective and adaptive system for expressing rice development. *Crop Sci.*, 40:436-443, 2000.
- EPSTEIN, E. & BLOOM, A. Nutrição mineral de plantas: princípios e perspectivas. 2.ed. Londrina, Planta, 2006. 403p.
- FERNANDES, M.S. & SOUZA, S.R. Absorção de nutrientes. In: FERNANDES, M.S., ed. Nutrição mineral de plantas. Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, 2006. p.115-152.
- FRANÇA, M.G.C.; ROSSIELLO, R.O.P.; ZONTA, E.; ARAÚJO, A.P. & RAMOS, F.T. Desenvolvimento radicular e influxo de nitrogênio em duas cultivares de arroz. *Pesq. Agropec. Bras.*, 34:1845-1853, 1999.
- GARGANTINI, H. & BLANCO, H.G. Absorção de nutrientes pela cultura de arroz. *Bragantia*, 24:515-528, 1965.
- GLASS, A.D.M. & PERLEY, J.E. Varietal differences in potassium uptake by barley. *Plant Physiol.*, 65:160-164, 1980.
- HORN, D.; ERNANI, P.R.; SANGOI, L.; SCHWEITZER, C. & CASSOL, P.C. Parâmetros cinéticos e morfológicos da absorção de nutrientes em cultivares de milho com variabilidades contrastantes. *R. Bras. Ci. Solo*, 30:77-88, 2006.
- LEMAIRE, D.; JEUFFROY, M.H. & GASTAL, F. Diagnosis tool for plant and crop N status in vegetative stage. Theory and practices for crop N management. *Eur. J. Agron.*, 28:614-624, 2008.
- MACHADO, A.A. Sistema de análise estatística para Windows (Winstat). Pelotas, Universidade Federal de Pelotas, 2001.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C. & OLIVEIRA, S.A. Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. Piracicaba, Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1989. 201p.
- MARSCHNER, H. Mineral nutrition of higher plants. 2.ed. London, Academic Press, 1995. 889p.
- MARTINS, P.O. Cinética de absorção de silício por cultivares de cana-de-açúcar e de arroz. Botucatu, Universidade Estadual Paulista, 2010. 67p. (Dissertação de Mestrado)
- NIELSEN, N.E. & BARBER, S.A. Differences among genotypes of corn in the kinetics of P uptake. *Agron. J.*, 70:695-698, 1978.
- NYE, P.H. & TINKER, P.B. The uptake properties of the root system. In: TINKER, P. B. & NYE, P.H., eds. Solute movement in the rhizosphere. New York, Oxford University Press, 2000. 448p.
- OLIVEIRA, R.F. & MIELNICZUK, J. Caracterização de três cultivares de soja (*Glycine max* (L) Merrill) quanto à eficiência de absorção e utilização de K⁺. *Agron. Sul Rio-grandense*, 14:251-260, 1978.
- PINTO, S.I.C. Cinética de absorção conjunta de fósforo, potássio, cálcio e magnésio e eficiência nutricional de macronutrientes de clones de eucalipto. Lavras, Universidade Federal de Lavras, 2009. 102p. (Tese de Doutorado)
- RENGEL, Z. & DAMON, P.M. Crops and genotypes differ in efficiency of potassium uptake and use. *Physiol. Plant.*, 133:624-636, 2008.
- REUTER, D.J. & ROBINSON, B.J., eds. Plant analysis: An interpretation manual. Collingwood, CSIRO, 1997. 572p.
- RÖMHELD, V. & KIRKBY, E.A. Research on potassium in agriculture: Needs and prospects. *Plant Soil*, 335:155-180, 2010.
- RUIZ, H.A. & FERNANDES FILHO, E.I. Cinética: Software para estimar as constantes $V_{m\acute{a}x}$, K_m da equação de Michaelis-Menten. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 20., Piracicaba, 1992. Anais... Campinas, Fundação Cargill, 1992. p.124-125. (Série Técnico-Científica, 180)
- SAMAL, D.; KOVAR, J.L.; STEINGROBE, B.; SADANA, U.S.; BHADORIA, P.S. & CLAASSEN, N. Potassium uptake efficiency and dynamics in the rhizosphere of maize (*Zea mays* L.), wheat (*Triticum aestivum* L.) and sugar beet (*Beta vulgaris* L.) evaluated with mechanistic model. *Plant Soil*, 332:105-121, 2010.
- SIDDIQI, M.Y.; GLASS, A.D.M.; HSIAO, A.I. & NINJAS, A.N. Genetic differences among wild oat lines in potassium uptake and growth in relation to potassium supply. *Plant Soil*, 99:93-106, 1987.
- SOCIEDADE SUL-BRASILEIRA DE ARROZ IRRIGADO-SOSBAI. Arroz irrigado: Recomendações técnicas da pesquisa para o sul do Brasil. Porto Alegre, 2010. 187p.
- SOCIEDADE SUL-BRASILEIRA DE ARROZ IRRIGADO - SOSBAI. Arroz irrigado: Recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil. Itajaí, SOSBAI, 2012. 179p.
- TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.A.; BOHNEN, H. & VOLKWEISS, S.J. Análise de solos, plantas e outros materiais. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174p.
- TENNANT, A. Test of modified line intersect method of estimating root length. *J. Appl. Ecol.*, 63:995-1001, 1975.
- VAHL, L.C.; ANGHINONI, I. & VOLKWEISS, S.J. Cinética de absorção de potássio afetada por ferro, cálcio e magnésio em genótipos de arroz de diferentes sensibilidades à toxicidade de ferro. *R. Bras. Ci. Solo*, 17:269-273, 1993.
- VILELA, L. & ANGHINONI, I. Morfologia do sistema radicular e cinética da absorção de fósforo em cultivares de soja afetados pela interação alumínio-fósforo. *R. Bras. Ci. Solo*, 8:91-96, 1984.

ZONTA, E.; BRASIL, F.C.; GOI, S. & ROSA, M.M.T. O sistema radicular e suas interações com o ambiente edáfico. In: FERNANDES, M.S., ed. Nutrição mineral de plantas. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. p.7-52.

WOODEND, J.J.; GLASS, A.D.M. & PERSON, C.O. Genetic variation under potassium stress. In: GABELMAN, H.W. & LAUGHMAN, B.C., eds. Genetic aspects of plant mineral nutrition. Dordrecht, Martinus Nijhoff, 1987. p.381-391.