

CARLOS HENRIQUE EITERER DE SOUZA

**ABSORÇÃO DE NITRATO E AMÔNIO POR GRAMÍNEAS
FORRAGEIRAS COM TOLERÂNCIA DIFERENCIAL AO ALUMÍNIO,
EM BAIXA DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO.**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para a obtenção do título de “Magister Scientiae”.

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2002

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

S729a Souza, Carlos Henrique Eiterer de, 1972-
2003 Absorção de nitrato e amônio por gramíneas forrageiras
com tolerância diferencial ao alumínio em baixa disponi-
bilidade de fósforo / Carlos Henrique Eiterer de Souza. –
Viçosa : UFV, 2003
61p. : il.

Orientador: Reinaldo Bertola Cantarutti
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de
Viçosa

1. Plantas forrageiras - Nutrição mineral. 2. Plantas for-
rageiras - Tolerância ao alumínio. 3. Plantas forrageiras -
Absorção de nitrato. 4. Plantas forrageiras - Absorção de
amônio. I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

CDD 19.ed. 633.2
CDD 20.ed. 633.2

CARLOS HENRIQUE EITERER DE SOUZA

**ABSORÇÃO DE NITRATO E AMÔNIO POR GRAMÍNEAS FORRAGEIRAS COM
TOLERÂNCIA DIFERENCIAL AO ALUMÍNIO, EM BAIXA DISPONIBILIDADE DE
FÓSFORO.**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para a obtenção do título de “Magister Scientiae”.

APROVADA: 25 de novembro de 2002

Prof. Roberto Ferreira de Novais
(Conselheiro)

Dr. Carlos Eugênio Martins
(Conselheiro)

Prof. Ivo Ribeiro da Silva

Prof^a. Hermínia Emília Pietro Martinez

Prof. Reinaldo Bertola Cantarutti
(Orientador)

A Deus, pelo dom da vida e companhia.

Aos meus pais, *Regina e Paulo*, pela vida, amor, carinho e confiança.

Aos meus irmãos *Sandra, Eduardo e Cláudia*, pelo incentivo, ajuda e por sempre estarem presentes em minha vida.

A eles que me ajudaram a vencer e concluir mais uma etapa da vida.

AGRADECIMENTOS

A Deus, que nos dá força para enfrentar e vencer todos os nossos desafios.

Ao povo brasileiro que, por meio de seus impostos, financiou meus estudos, através da Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), e à Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Solos, pela oportunidade de realização deste curso.

Ao professor e orientador Reinaldo Bertola Cantarutti, pela amizade, confiança, paciência e dedicação durante os momentos mais decisivos da realização deste trabalho.

Ao Dr. Carlos Eugênio Martins, pela amizade, companheirismo, atenção, sugestões e críticas que permitiram o aprimoramento e aperfeiçoamento deste trabalho.

Ao professor Roberto Ferreira de Novais, pelas críticas e sugestões que permitiram o aperfeiçoamento deste trabalho.

Ao professor Ivo Ribeiro da Silva, pela atenção, sugestões, e disponibilidade de sempre ajudar e ensinar.

À professora Hermínia Emília Pietro Martinez, pelas sugestões, críticas e credibilidade que tornaram capaz a composição deste trabalho.

À amiga Lídia Tarchetti Diniz, pela amizade e companheirismo durante a realização de todas as análises laboratoriais, sempre com um sorriso amigo e franco.

Aos amigos Felipe Andrade, Guilherme Cadinelli e Ricardo Gonçalves (Buiú) conselheiros de todas as horas, pelos ensinamentos, apoio indiscutível e paciência pelos incômodos.

Aos funcionários do Departamento de Solos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

Aos amigos fraternos do tempo de graduação Toninho, Saquê, Curu, Fungo, Érica e Aline que fizeram e fazem parte de mais essa etapa.

Aos meus irmãos de coração Juliano e Fernando Ampessan, pela amizade, confiança e companheirismo durante os momentos alegres e difíceis de mestrado.

À querida D. Martha e seu filho, meu amigo Ignácio Aspiazú, pelo carinho, compreensão, aconchego e moradia que permitiram a manutenção da tranquilidade durante a realização deste trabalho.

Aos amigos Gaúcho, Carla, Dudu e Christiano, moradores da minha 2ª casa, pela amizade, carinho, companheirismo, conversas, jantares, almoços, caronas, e o melhor, churrascos e cervejas comigo divididas.

A meus familiares que sempre se mostraram entusiasmados com o aprimoramento dos meus estudos, em especial aos meus primos Álvaro, Gláucio e Luciana sempre amigos e companheiros.

À Jiló, Isabella, Paulão, Akemi, Rosely, Tom, Teco, Guilherme Donagemma, Bindão, Ronaldo, Rogério, Russo, Tomás, Augusto, Marco Antônio, Nelci, Vitória e Adilson, pela amizade, companheirismo e apoio nos momentos certos.

A todos os professores que participaram da minha formação, a eles meu eterno agradecimento pelos ensinamentos e experiência que contribuíram para que o meu objetivo fosse alcançado.

A todos que não foram citados, nominalmente, mas que contribuíram para que o meu objetivo fosse alcançado.

BIOGRAFIA

Carlos Henrique Eiterer de Souza, filho de Paulo Bonifácio de Souza e Maria Regina Eiterer de Souza, natural de Juiz de Fora no Estado de Minas Gerais.

Em 1995, iniciou o Curso de Agronomia, na Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, graduando-se em janeiro de 2000. Durante a graduação, foi bolsista de iniciação científica do CNPq no Departamento de Solos.

Em agosto de 2000, iniciou o Programa de Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas, na Universidade Federal de Viçosa, submetendo-se à defesa de tese em 25 de novembro de 2002.

CONTEÚDO

	Página
RESUMO.....	viii
ABSTRACT.....	x
INTRODUÇÃO	1
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	3
CAPÍTULO 1 - TOLERÂNCIA AO ALUMÍNIO DE TRÊS ESPÉCIES DE GRAMÍNEAS FORRAGEIRAS.	
RESUMO	4
1- INTRODUÇÃO	6
2 - MATERIAL E MÉTODOS	8
2.1 – OBTENÇÃO DAS PLÂNTULAS	8
2.2 – EXPOSIÇÃO DAS PLANTAS A CONCENTRAÇÕES CRESCENTES DE ALUMÍNIO	9
3 - RESULTADOS E DISCUSSÃO	11
3.1 – MATÉRIA SECA DA RAIZ E PARTE AÉREA	11
3.2 – ACÚMULO DE AL, P, MG E CA NA MATÉRIA SECA DE RAIZ E PARTE AÉREA DAS FORRAGEIRAS	13
4 – CONCLUSÕES	23
5 – REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS	24
CAPÍTULO 2 - ABSORÇÃO DE NITRATO E AMÔNIO POR DUAS GRAMÍNEAS FORRAGEIRAS, EXPOSTAS AO ALUMÍNIO E À DEFICIÊNCIA DE FÓSFORO.	
RESUMO	28
1- INTRODUÇÃO	30
2 - MATERIAL E MÉTODOS	33
2.1 – ABSORÇÃO DE NO_3^- E NH_4^+ PELAS PLANTAS EXPOSTAS AO AL	33
2.2 - ABSORÇÃO DE NO_3^- E NH_4^+ PELAS PLANTAS PRÉ-EXPOSTAS À SOLUÇÃO COM AL E À AUSÊNCIA DE P	35

	Página
3 - RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
3.1 – ABSORÇÃO DE NO ₃ ⁻ E NH ₄ ⁺ PEÇAS PLANTAS EXPOSTAS À SOLUÇÃO COM AL	37
ACÚMULO DE AL NO TECIDO RADICULAR	37
CINÉTICA DE ABSORÇÃO DE NO ₃ ⁻ E NH ₄ ⁺	38
3.2 – ABSORÇÃO DE NO ₃ ⁻ E NH ₄ ⁺ PEÇAS PLANTAS PRÉ- EXPOSTAS À SOLUÇÃO COM AL E AUSÊNCIA DE P	43
ACÚMULO DE AL E P.....	43
CINÉTICA DE ABSORÇÃO DE NO ₃ ⁻ E NH ₄ ⁺	43
4 – CONCLUSÕES	48
5 - REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS	49
 RESUMO DAS CONCLUSÕES	 53
APÊNDICE.....	56

RESUMO

SOUZA, Carlos Henrique Eiterer de, M.S., Universidade Federal de Viçosa, novembro de 2002. **Absorção de nitrato e amônio por gramíneas forrageiras com tolerância diferencial ao alumínio em baixa disponibilidade de fósforo.** Orientador: Reinaldo Bertola Cantarutti. Conselheiros: Roberto Ferreira de Novais e Carlos Eugênio Martins

A atividade pecuária tem sido promissora na região de Cerrado por dispor de recursos forrageiros com ampla capacidade de adaptação a condições de estresses, como elevados teores de alumínio trocável e baixa disponibilidade de nutrientes, principalmente fósforo. Plantas adaptadas a essas condições apresentam, seguramente, maior afinidade pela absorção de nitrogênio na forma amoniacal, no entanto há evidências de elevados teores de nitrato em solos ácidos. Considerando-se que a baixa disponibilidade de fósforo compromete mais a absorção de nitrato do que a de amônio, as plantas poderão sofrer deficiência de nitrogênio em solos tropicais se ocorrer elevado teor de nitrato. Assim, o presente trabalho teve por objetivo avaliar a absorção do NO_3^- e NH_4^+ por gramíneas forrageiras com diferentes graus de tolerância ao alumínio, sob o efeito de elevada concentração de Al e baixa disponibilidade de P. Inicialmente foram realizados ensaios para caracterizar as gramíneas *Brachiaria brizantha* cv. Marandu, *Brachiaria humidicola* e Braquiária híbrido cv. Mulato quanto à tolerância ao alumínio. Foram avaliados também a produção de matéria seca na parte aérea e raiz e os

conteúdos de Al, P, Ca e Mg no tecido vegetal. Estabeleceu-se a que de 1,3, 1,0 e 0,7 mmol.L⁻¹ de Al na solução proporcionaram redução de 50% na produção de matéria seca na parte aérea da *B. humidicola*, Braquiária híbrido e *B. brizantha*, respectivamente, sendo definidas como concentrações críticas. Na seqüência foram realizados dois ensaios em solução nutritiva para avaliar a absorção do nitrato e amônio pela *B. brizantha* e *B. humidicola* sob o estresse de Al (concentrações citadas acima) e com ausência de P. A cinética de absorção de nitrato e amônio pelas foi descrita pela equação de Michaelis-Menten estimando-se o influxo máximo (Imax), a constante de afinidade do sistema de absorção (Km) e a concentração mínima para que haja influxo (Cmin) por meio do método gráfico-matemático. No primeiro ensaio utilizando solução nutritiva com 100 µmol.L⁻¹ de N-NO₃⁻ ou 100 µmol.L⁻¹ de N-NO₃⁻ mais 100 µmol.L⁻¹ de N-NH₄⁺ utilizaram-se plantas expostas por 24 e 72h a tratamentos sem Al e às respectivas concentrações críticas de Al. No segundo ensaio as plantas foram submetidas a um período de quatro dias de omissão de P e expostas à concentração crítica de Al por 24 h. A *B. humidicola* apresentou de modo geral maiores valores de Imax com menores valores de Km e Cmin, sugerindo maior absorção do nitrato e amônio do que o *Brachiaria brizantha* cv. Marandu. A exposição das plantas à baixa disponibilidade de fósforo e elevadas concentrações de Al proporcionou maiores reduções no Imax e aumentos de Km e Cmin para o amônio e nitrato nas duas gramíneas. O aumento dos valores de Km para o nitrato quando as duas gramíneas foram submetidas às concentrações críticas de Al e, ou, baixa disponibilidade de P, sugerem redução na afinidade no sistema de absorção deste íon. O aumento no Cmin sugere que o influxo líquido pode cessar mesmo quando este íon estiver presente em altas concentrações.

ABSTRACT

SOUZA, Carlos Henrique Eiterer de, M.S., Universidade Federal de Viçosa, November 2002. **Nitrate and ammonium uptake by forage gramineae with differential aluminum tolerance in low phosphorus availability.** Adviser: Reinaldo Bertola Cantarutti. Committee Members: Roberto Ferreira de Novais and Carlos Eugênio Martins.

Cattle activity has been promising in the savannah area because of availability of forage resources with wide adaptation capacity to stress conditions, such as high contents of exchangeable aluminum and low nutrient availability, mainly phosphorus. Plants adapted to those conditions show, surely, higher uptake affinity for nitrogen in the ammonium form, but there are evidences of high nitrate contents in acid soils. Considering that the low phosphorus availability hinders more the of uptake nitrate than ammonium, plants can suffer nitrogen deficiency in tropical soils if a high nitrate content occurs. The objective of this work was to evaluate NO_3^- and NH_4^+ uptake by grass forages with different of degrees aluminum tolerance, under conditions of high aluminum concentration and low P availability. Initially, experiments were carry out to characterize the gramineae *Brachiaria brizantha* cv. Marandu, *Brachiaria humidicola* and hybrid *Braquiaria* cv. Mulato with in relation to aluminum tolerance. The shoot and root dry matter production and tissue Al, P, Ca and Mg contents were also evaluated. It was established that the Al concentrations of 1,3, 1,0 and 0,7 mmol.L^{-1} in solution provided

reduction of 50% in the dry matter production of the aerial part of the *B. humidicola*, hybrid Braquiaria and *B. brizantha*, respectively. Those were defined as critical concentrations. Following, two experiments were conducted in nutrient solution to evaluate the nitrate and ammonium uptake by *B. brizantha* and *B. humidicola* under Al stress (concentrations mentioned above) and in the absence of P. The nitrate and ammonium uptake kinetics was described by the equation of Michaelis-Menten by estimating the maximum influx (I_{max}), the uptake system affinity constant (K_m) and the minimum concentration required to have a net influx (C_{min}) through a graphic-mathematical method. In the first experiment using nutrient solution with $100 \mu\text{mol.L}^{-1}$ of N-NO_3^- or $100 \mu\text{mol.L}^{-1}$ of N-NO_3^- plus $100 \mu\text{mol.L}^{-1}$ of N-NH_4^+ , it was used plants exposed for 24 and 72 h to treatments without Al and to respective critical Al concentrations. In the second experiment, plants were submitted to a period of four days of P omission and then exposed to the critical Al concentration for 24 h. The *B. humidicola* presented, in general, higher values of I_{max} with smaller values of K_m and C_{min} , suggesting higher nitrate and ammonium uptake than *Brachiaria brizantha* cv. Marandu. The exposition of the plants to the low phosphorus availability and high Al concentrations provided higher reductions in I_{max} and increases of K_m and C_{min} for ammonium and nitrate in the two gramineae. The increase of the nitrate K_m values when the two gramineae were submitted to critical Al concentrations and, or, low P availability suggests an affinity reduction in this ion's uptake system. The increase in C_{min} suggests that the net influx can cease even when this ion is present in high concentrations.

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, aproximadamente 1,8 milhão de km² de solos sob vegetação de cerrado caracteriza-se por apresentar elevada acidez, deficiência em P, Ca²⁺, Mg²⁺ e elevados teores de Al³⁺ e Mn. A baixa produtividade e a limitada resposta das culturas à fertilização nesses solos são, em parte, atribuídas à presença de Al em concentrações tóxicas. A baixa disponibilidade de N é outro fator que, freqüentemente, limita a produtividade das culturas.

Nessas condições, diante à baixa atividade das bactérias nitrificantes, espera-se que o amônio seja a forma inorgânica de nitrogênio predominante. Coelho (1995) em estudos com aplicação de uréia em solo de cerrado encontrou mais de 80% do nitrogênio na forma de NH₄⁺. No entanto, solos tropicais ácidos podem apresentar elevados teores de nitrato, considerando que a nitrificação aumenta com a correção da acidez (Hayatsu & Kosuge, 1993; Silva et al., 1994; Kreutzer, 1995) e que microrganismos heterotróficos envolvidos na mineralização da matéria orgânica também podem ter ação nitrificante (Adams, 1986). Os elevados teores de nitrato podem ocorrer na forma de pulsos devido à maior taxa de mineralização da matéria orgânica desencadeada, por exemplo, pelas condições ambientais favoráveis no verão ou pelas práticas de preparo dos solos.

A absorção de nitrato pelas plantas é, segundo Magalhães (1996), mais comprometida pela baixa disponibilidade de fósforo do que a absorção de

amônio, o que é relevante para os solos tropicais onde a deficiência de fósforo é freqüente, quer de forma contínua, ou esporádica, devido às restrições à difusão deste elemento (Novais & Smyth, 1999).

Grandes áreas de Cerrado têm sido incorporadas ao sistema produtivo por meio da atividade pecuária com o uso de forrageiras com características de tolerância ao alumínio e, por conseguinte mais eficazes na absorção de nitrogênio na forma amoniacal. Nestas condições, havendo teores elevados de N na forma nítrica as plantas podem estar sujeitas à deficiência de nitrogênio, além do que e a lixiviação do nitrato pode ser intensificada.

Há, portanto, implicações tanto do ponto de vista agronômico como ambiental, considerando que a lixiviação de nitrato compromete o balanço entre as formas inorgânicas de nitrogênio no solo, o que afeta o crescimento das plantas (Vale et al., 1998), assim como pode acumular-se no lençol freático ou mesmo em águas superficiais. Diante do exposto torna-se importante conhecer o comportamento das forrageiras tropicais quanto à absorção de nitrato e amônio, sob o efeito de elevada concentração de Al e baixa disponibilidade de P.

2. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADAMS, J.A. Identification of heterotrophic nitrification in strongly acid larch humus. *Soil Biol. Biochem.*, 18:339-341, 1986.
- COELHO, A.M. Efeito de níveis de N-uréia na dinâmica de amônio e nitrato em Latossolo cultivado e irrigado. In: CONGRESSO NACIONAL DE LA CIENCIA DEL SUELO, Temuco, 1995. Anais. Temuco, 1995. p.7
- HAYATSU, M.; KOSUGE, N. Effects of urea fertilization and liming on nitrification in Cerrados soils (Brazil). *Soil Sci. Plant Nutr.*, 39:367-371, 1993.
- KREUTZER, K. Effects of forest liming on soil processes. *Plant Soil*, 168/169:447-470, 1995.
- MAGALHÃES, J.V. Absorção e translocação de nitrogênio por plantas de milho (*Zea mays*, L.) submetidas a períodos de omissão de fósforo na solução nutritiva. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1996. 76p. (Tese de Mestrado)
- NOVAIS, R.F. & SMYTH, T.J. Fósforo em solo e planta em condições tropicais. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1999. 399p.
- SILVA, C.A.; VALE, F.R. & GUILHERME, L.R.G. Nitrificação em Latossolos da região sul de Minas Gerais: efeito da acidez do solo. *Ci. Prát.*, 18:388-394, 1994.
- VALE, F.R.; GUAZELLI, E.M.F.; FURTINI NETO, A.E.; & FERNANDES, L.A. Cultivo do feijoeiro em solução nutritiva sob proporções variáveis de amônio e nitrato. *R. Bras. Ci. Solo*, 22: 35-42, 1998.

CAPÍTULO 1

TOLERÂNCIA AO ALUMÍNIO DE TRÊS ESPÉCIES DE GRAMÍNEAS FORRAGEIRAS.

RESUMO

Grandes áreas de Cerrado têm sido incorporadas ao sistema produtivo por meio da atividade pecuária ocupando solos que são comumente caracterizados pela baixa disponibilidade de nutrientes, elevada acidez e altos teores de alumínio trocável. A exploração do potencial genético de espécies, variedades e cultivares que diferem quanto à tolerância ao excesso de alumínio é a opção mais promissora para viabilizar a utilização destes solos. Assim, o presente trabalho teve por objetivo caracterizar a tolerância das espécies forrageiras *Brachiaria brizantha* cv. Marandu, *Brachiaria humidicola* e o Braquiária híbrido cv. Mulato, ao alumínio. As plântulas foram cultivadas em solução nutritiva de Clark (Clark et al., 1975) modificada, com 50% da sua concentração original, e concentrações crescentes de Al, na forma $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, por um período de 15 dias. No final dos ensaios, foram determinados a produção de matéria seca e os conteúdos de Al, Ca, P e Mg na raiz e parte aérea. Os dados foram submetidos à análise de variância e ajustaram-se regressões para a produção de MS e os conteúdos de Al, P, Ca e Mg em relação às concentrações de Al. A partir das regressões para matéria seca da parte aérea, caracterizaram-se as concentrações críticas de Al, como aquela em que se obteve 50% da matéria seca da parte aérea das plantas obtida em solução sem Al. As concentrações críticas foram 1,3, 1,0 e 0,7 mmol L^{-1} de

Al para *B. humidicola*, Braquiária híbrido e *B. brizantha*, respectivamente. O B. híbrido apresentou em comparação às outras gramíneas maior capacidade de restrição ao acúmulo de Al, tanto nas raízes quanto na parte aérea. Por outro lado, o maior grau de tolerância do *B. humidicola* foi evidenciado pela maior capacidade de acumular Al no tecido vegetal dentro da faixa de concentração de Al na solução abaixo daquela estabelecida como crítica.

1. INTRODUÇÃO

O alumínio é o elemento metálico mais abundante na crosta terrestre, sendo sua forma trocável no solo tóxica para as plantas, quando em concentrações elevadas (Martin, 1988; Williams, 1999). Em termos globais, cerca de 40% dos solos agricultáveis apresentam altos teores de Al trocável (Wright, 1989). Na América Latina os solos ácidos correspondem a mais de 50% dos solos agricultáveis (Eswaran et al., 1997), sendo um dos principais limitantes da produção de diversas culturas, inclusive pastagens. No Brasil, altos teores de Al trocável são encontrados principalmente em solos de Cerrado, caracterizados pela elevada acidez, baixa capacidade de troca catiônica e reduzida disponibilidade de fósforo.

Os sintomas da toxidez de alumínio nem sempre são facilmente identificáveis, porque a eles associa-se a deficiência de outros nutrientes. Geralmente, esses sintomas são ocasionados pela inibição da expansão celular nas raízes seguido pela inibição da divisão celular, provocando o desenvolvimento de raízes anatomicamente anormais (White, 1976). Tal sintoma pode aparecer de forma severa, mesmo após curta exposição das raízes a teores tóxicos de Al (Clarkson, 1965; Roy et al., 1989; Lazof & Holland, 1999).

Segundo Foy et al. (1992) o alumínio ainda bloqueia o movimento de nutrientes como P, Ca e Mg para a parte aérea das plantas, fazendo com que

seus sintomas de deficiência se manifestem nas folhas como um efeito secundário da toxidez do alumínio. Entretanto, esse efeito é bastante variável entre espécies de plantas e mesmo entre cultivares de uma mesma espécie. Tal característica tem sido explorada no sentido de selecionar espécies ou cultivares adaptados às condições dos solos ácidos (Siqueira, 1986; Fuente-Martinez & Herrera-Estrella, 1999).

Plantas adaptadas a ambientes ácidos, com altos teores de Al trocável apresentam mecanismos que lhes permitem desenvolver-se neste ambiente. Vários mecanismos de tolerância ao alumínio vêm sendo estudados, evidenciando formas de adaptação das diferentes espécies, revelando a complexidade da toxidez do alumínio para as plantas (Silva et al., 2002).

Um dos mecanismos bastante estudado é a capacidade de utilização de nutrientes, principalmente fósforo e cálcio na presença de elevadas concentrações de alumínio (Foy et al, 1992; Lüttge & Clarkson, 1992), uma vez que as plantas otimizam a utilização destes nutrientes, crescendo e desenvolvendo-se normalmente nessa condição. Ainda, dentre esses mecanismos, pode-se citar a capacidade da planta em absorver o alumínio e, ou complexá-lo após sua absorção.

Dentro deste contexto, o presente trabalho teve por objetivo caracterizar a tolerância ao alumínio de três espécies de capim braquiária, em solução nutritiva.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Os experimentos foram conduzidos em casa de vegetação e câmara de crescimento, no Campus da Universidade Federal de Viçosa. Foram utilizadas as gramíneas forrageiras, *Brachiaria brizantha* cv. Marandu, *Brachiaria humidicola* e o Braquiária híbrido cv. Mulato.

2.1 – Obtenção das plântulas

Sementes de cada gramínea foram germinadas em germinador com umidade (80%) e temperatura (25° C) controladas. As plântulas foram selecionadas quanto à uniformidade e transplantadas para caixa plástica contendo 30 L de solução nutritiva de Clark modificada (Clark et al., 1975). As concentrações utilizadas foram de 1,3 Ca; 0,5 N-NH₄; 3,5 N-NO₃; 0,9 K; 0,035 P; 0,3 Mg (mmol.L⁻¹) e 9,5 B; 1,0 Zn; 0,025 Cu; 3,5 Mn; 0,03 Mo e 22,5 Fe (Fe-EDTA) (μmol.L⁻¹), correspondendo a 50% da concentração original.

As caixas foram mantidas na câmara de crescimento com temperatura diurna média de 25° C e fotoperíodo de 12 h. A solução sofreu arejamento constante e o pH foi monitorado, sendo mantido em 5,0 com a adição de HCl ou NaOH 1 mol.L⁻¹. As plântulas permaneceram nestas condições por um

período de cinco dias para se adaptarem à salinidade da solução (Furlani & Furlani, 1988).

2.2 – Exposição das plantas a concentrações crescentes de alumínio

Solução nutritivas de Clark com concentrações crescentes de Al, na forma de $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, foram preparadas segundo Furlani & Furlani (1988). Utilizando-se o software GEOCHEM (Parker et al., 1995) foram determinadas as atividades de alumínio trivalente para cada concentração de alumínio na solução nutritiva (Quadro 1).

Os tratamentos consistiram da solução nutritiva sem Al e com quatro concentrações para os experimentos com *B. brizantha* e *B. humidicola* e cinco concentrações no ensaio com *B. híbrido* cv. Mulato. Em todo os ensaios o delineamento experimental foi o de blocos ao acaso com três repetições.

As plântulas foram cultivadas em caixas plásticas contendo 10 L de solução nutritiva com as respectivas concentrações de Al por um período de 15 dias em casa de vegetação. As soluções foram constantemente arejadas e o pH monitorado, sendo mantido em $4,0 \pm 0,2$ com a adição de HCl ou NaOH 1 mol.L^{-1} .

Decorrido este período as plantas foram coletadas e separadas em raiz e parte aérea, lavadas com água deionizada. Após serem secas em estufa com circulação forçada de ar a 65°C por 72 horas determinou-se o peso da matéria seca da raiz (MSR) e da parte aérea (MSPA).

Foram determinados os teores de P, Ca, Mg e Al na MSR e MSPA após digestão nitroperclórica. O fósforo foi dosado por colorimetria com base na formação do complexo fósforo-molibdico em meio reduzido segundo Defilipo & Ribeiro (1996). Cálcio, magnésio e alumínio foram determinados por espectrometria de emissão atômica em plasma induzido.

Os dados foram submetidos à análise de variância ajustando-se regressões para produção de MS e conteúdos de Al, P, Ca e Mg de acordo com

Quadro 1 – Concentrações de alumínio (Al) e atividade de Al^{3+} ($a_{Al^{3+}}$) na solução nutritiva para cada espécie forrageira

Forrageira	Forma de Al	Concentração / Atividade				
		mmol.L ⁻¹				
<i>B. brizantha</i> cv. Marandu	Al ¹	0,250	0,500	1,000	1,500	
	$a_{Al^{3+}}$ ²	0,025	0,058	0,126	0,192	
B. híbrido cv. Mulato	Al	0,300	0,600	0,900	1,200	1,500
	$a_{Al^{3+}}$	0,033	0,071	0,112	0,155	0,192
<i>B. humidicola</i>	Al	0,500	1,000	1,500	2,000	
	$a_{Al^{3+}}$	0,058	0,126	0,192	0,281	

¹ Al adicionado à solução nutritiva na forma de $AlCl_3 \cdot 6H_2O$;

² Determinada por especiação utilizando-se software GEOCHEM (Parker et al., 1995)

as concentrações de Al. A partir das regressões estimaram-se as concentrações de Al que condicionaram 50% da matéria seca das plantas cultivadas em solução sem Al, sendo denominadas de concentração crítica.

Com base nos conteúdos (Q_i) de Al, P, Ca e Mg em toda a planta e na matéria seca da raiz (MSR) estabeleceu-se o índice de absorção (IA) expresso como $mg.g^{-1}$:

$$IA = \frac{Q_i}{MSR}$$

Por meio da razão entre os conteúdos na parte aérea (QA_i) e na raiz (QR_i) estabeleceram-se os índices de partição (IP), dos nutrientes P, Ca e Mg e do Al na planta, expresso como $mg.mg^{-1}$:

$$IP = \frac{QA_i}{QR_i}$$

A razão entre a biomassa total (MST) e os conteúdos de P, Ca e Mg na biomassa (Q_i) determinaram-se os coeficientes de utilização biológica (CUB) para estes nutrientes, expresso em $g.mg^{-1}$:

$$CUB = \frac{MST}{Q_i}$$

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Matéria seca da raiz e da parte aérea

O aumento da concentração de Al na solução nutritiva proporcionou redução significativa na matéria seca acumulada, tanto na parte aérea (MSPA) como na raiz (MSR) (Figura 1).

Embora as três espécies tenham apresentado comportamentos semelhantes, a *B. brizantha* cv. Marandu mostrou-se a menos tolerante (Figura 1), com redução de 65 e 36% na produção da MSPA e MSR, respectivamente, quando submetida a maior concentração de Al. Para a *B. humidicola* estas reduções foram, respectivamente de 59 e 48% e para a B. híbrida 35% e 55%.

Helyar (1978) observou que doses crescentes de Al causaram declínio exponencial na produção da parte aérea. Com espécies mais tolerantes tem-se observado que baixas concentrações de Al estimulam a produção, mas altas concentrações a deprimem. Embora o Al não seja considerado um elemento essencial, em baixas concentrações ele pode induzir aumento no crescimento ou propiciar outros efeitos desejáveis (Velooso et al., 2000).

Segundo Rengel (1996) o efeito negativo do Al sobre o desenvolvimento das plantas expressa-se pela redução na produção de matéria seca nas raízes e parte aérea, o que se deve, de acordo com Lazof & Holland

(1999), à inibição da expansão e divisão celular nas raízes e o bloqueio da absorção e transporte de nutrientes para a parte aérea. Vasconcelos et al. (2002) e Jan & Pettersson (1995) afirmaram que para espécies tolerantes ao Al a produção da parte aérea é, comumente, mais afetada que a do sistema radicular.

Santos (1991) e Macedo et al. (1997) ressaltaram que a produção de matéria seca radicular é uma medida sensível para a distinguir espécies tolerantes ao Al, em experimentos de longa duração. Vicente et al. (1998)

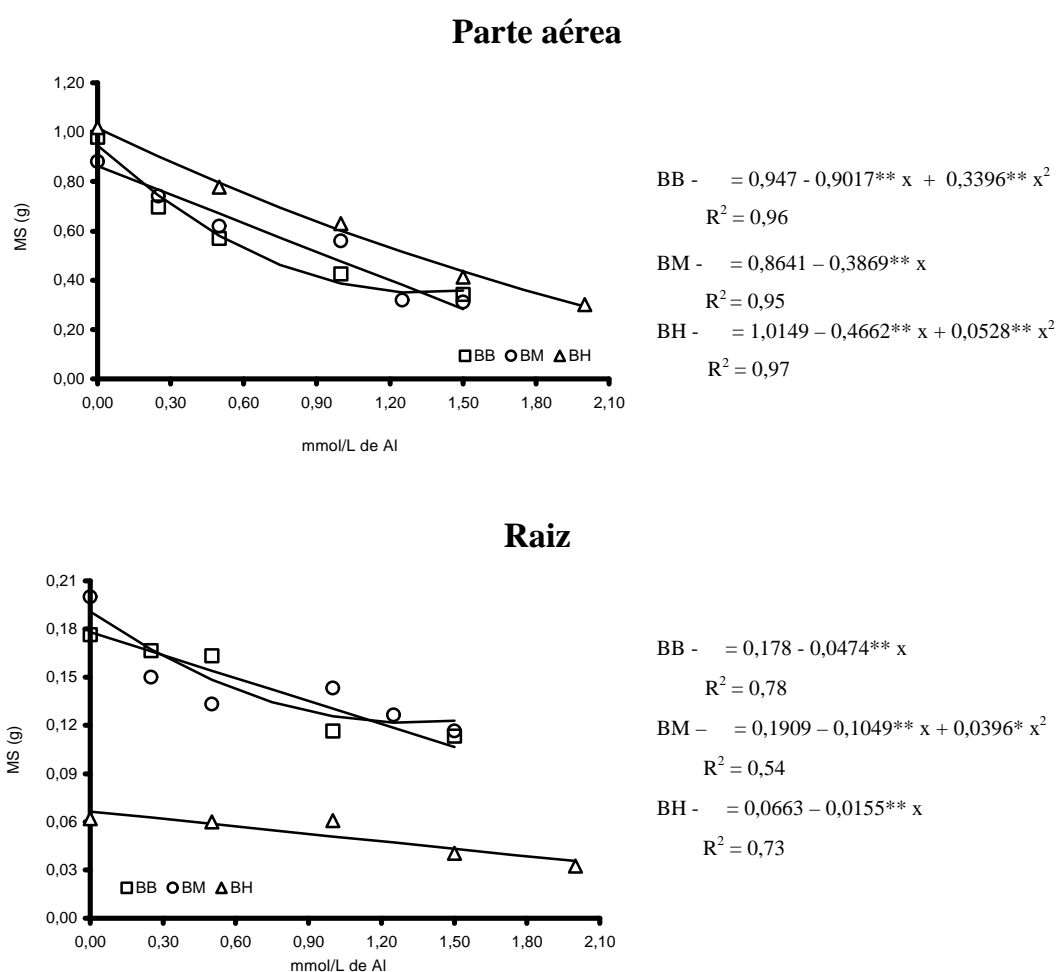


Figura 1 – Produção de matéria seca (MS) de raiz e parte aérea de acordo com as concentrações de alumínio em solução nutritiva, para *B. brizantha* cv. Marandu (BB), *B. híbrido* cv. Mulato (BM) e *B. humidicola* (BH).

também indicaram que a MSR é de sensibilidade intermediária em experimentos com duração de três a quatro semanas, no entanto é de baixa eficiência em experimentos de curta duração.

De acordo com as regressões ajustadas (Figura 1) neste experimento a produção de MSPA mostrou-se mais sensível para discriminar o efeito da concentração de Al na solução sobre o crescimento das três gramíneas.

As concentrações de Al e as respectivas atividades de Al^{3+} , associadas a 50% da produção de MSPA, caracterizadas como concentrações críticas (Quadro 2) indicam que a *B. humidicola* foi a mais tolerante ao Al, seguida da B. híbrida e da *B. brizantha* cv. Marandu.

3.2 Acúmulo de alumínio, fósforo, magnésio e cálcio na matéria seca de raiz e parte aérea das forrageiras

Os conteúdos de Al nas forrageiras aumentaram significativamente de acordo com os incrementos de sua concentração na solução nutritiva (Figura 2). Apesar de acumularem maiores quantidades de Al nas raízes, como evidencia o índice de partição (IP) do Al (Quadro 3), as curvas da figura 2 indicam os acúmulos de Al tanto nas raízes como na parte aérea tenderam a ser máximos próxima à concentração críticas de Al na solução.

A *B. humidicola*, que se mostrou mais tolerante ao Al, apresentou maior IA (Quadro 3), porém o IP indica a tendência de acumular o Al nas raízes. Os menores conteúdos de Al na B. híbrida, associados aos menores IA sugerem que a tolerância desta espécie ao Al deve-se à mecanismos que previnem sua absorção. De acordo com os valores do IP, tanto a B. híbrida, como a *B. brizantha* translocaram maior proporção do Al para a parte aérea (Quadro 3).

A variação dos conteúdos de P nas raízes das *B. brizantha* e *B. humidicola* apresenta-se como tendência inversa ao acúmulo de Al, evidenciando a interação entre os dois elementos (Figura 3).

Quadro 2 – Concentrações críticas de alumínio (Al) e respectivas atividades de ($a_{Al^{3+}}$) na solução, associadas a cinquenta por cento da produção de matéria seca da parte aérea (MSPA-50) das forrageiras

Forrageira	MSPA-50	Al	$a_{Al^{3+}}$
	G		mmol.L ⁻¹
<i>B. brizantha</i> cv. Marandu	0,44	0,700	0,084
<i>B. híbrido</i> cv. Mulato	0,49	1,100	0,141
<i>B. humidicola</i>	0,58	1,300	0,171

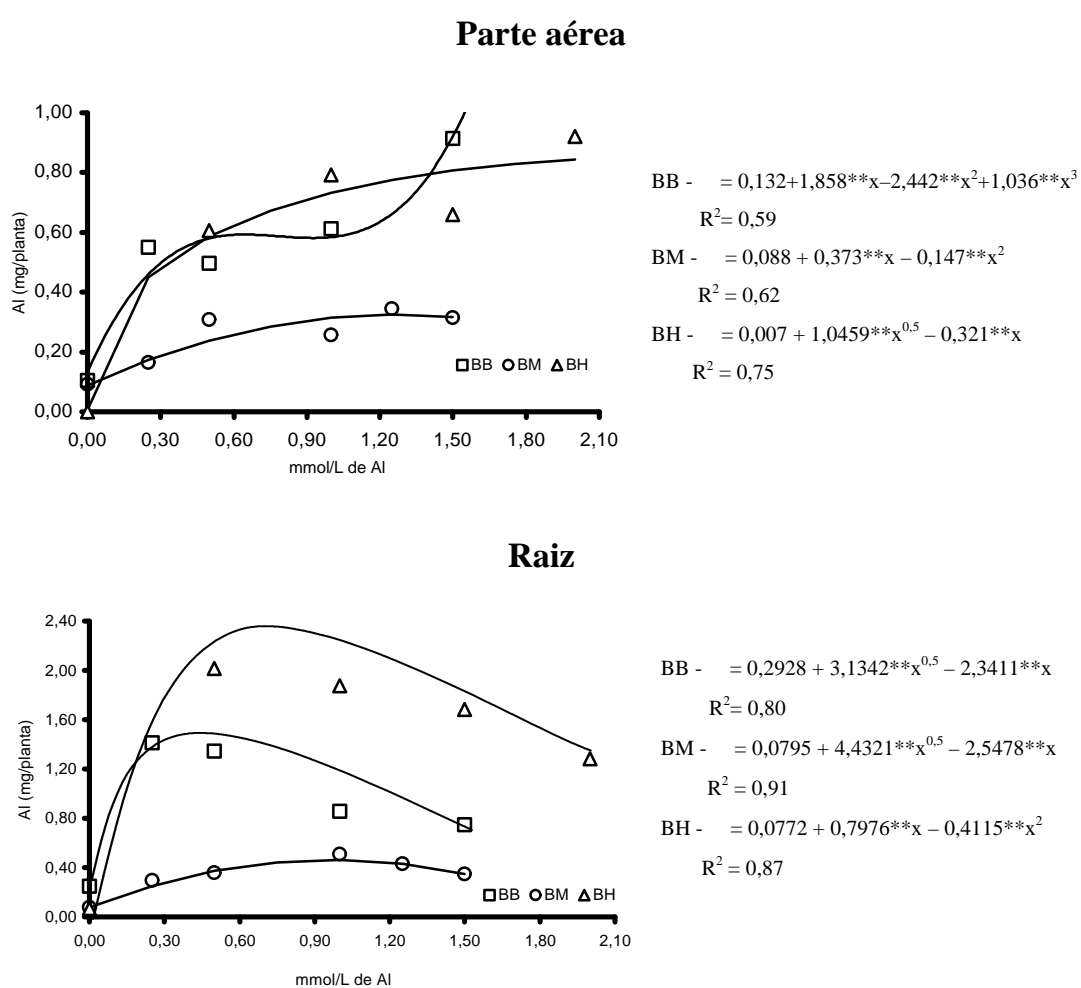


Figura 2 – Conteúdo de alumínio no tecido vegetal de *B. brizantha* cv. Marandu (BB), *B. híbrido* cv. Mulato (BM) e *B. humidicola* (BH) de acordo com as doses de alumínio em solução nutritiva.

Quadro 3 – Índices de partição do Al (IP) e de absorção (IA) nas plantas de *B. brizantha* cv. Marandu, *B. humidicola* e *B. híbrido* cv. Mulato, cultivadas em solução com concentrações crescentes de alumínio (Al)

Espécie	Al	IP¹	IA²
	mmol.L ⁻¹	mg.mg ⁻¹	mg.g ⁻¹
<i>B. brizantha</i>	0,25	0,38	11,78
	0,50	0,37	11,26
	1,00	0,71	12,58
	1,50	1,22	14,68
<i>B. humidicola</i>	0,50	0,30	43,74
	1,00	0,42	43,86
	1,50	0,39	57,94
	2,00	0,71	68,34
Braquiária híbrido	0,30	0,55	3,08
	0,60	0,86	4,99
	0,90	0,50	5,34
	1,20	0,80	6,10
	1,50	0,90	5,66

^{1/} Relação entre os conteúdos de Al na parte aérea e raízes das plantas

^{2/} Relação entre o conteúdo de Al na parte aérea e a massa radicular

Em geral, o Al faz decrescer os teores de fósforo, potássio, cálcio, magnésio, ferro e manganês na planta (Veloso et al., 2000), fato que, geralmente, está ligado a maior afinidade do Al pelos sítios de absorção da parede celular (Foy et al., 1992).

Segundo Matsumoto et al. (1976), há evidências de que o alumínio ligue-se especificamente ao fósforo por uma reação de adsorção-precipitação na parede das células epidérmicas e corticais, aos grupos carboxílicos livres dos ácidos poligalacturônicos da lamela média, que são, provavelmente, os sítios desta adsorção (Klimashevskii et al., 1972; McCormick & Borden, 1974).

McCormick & Borden (1972) observaram sítios de fixação de fosfato pelo alumínio dentro das raízes das plantas, sugerindo que ela ocorre na parede celular e membrana citoplasmática da epiderme e células do córtex.

De forma inversa ao aumento da concentração de Al na solução nutritiva houve uma tendência à diminuição dos conteúdos de P na parte aérea

(Figura 3), o que pode estar relacionado com a complexação do P pelo alumínio no meio externo à raiz ou mesmo nas membranas celulares, diminuindo sua absorção e posterior transporte para a parte aérea (McCormick & Borden, 1972).

O alumínio pode interferir na absorção, transporte e utilização de vários nutrientes, entre os quais o P (Pavan & Bingham, 1982; Nogueira et al., 1989), e o Ca (Vasconcellos, 1987; Nogueira et al., 1989). Neste sentido, Pavan & Bingham (1982), trabalhando com cafeeiro, verificaram o aumento dos teores de P nas raízes e a diminuição na parte aérea em decorrência do aumento dos teores de alumínio na planta.

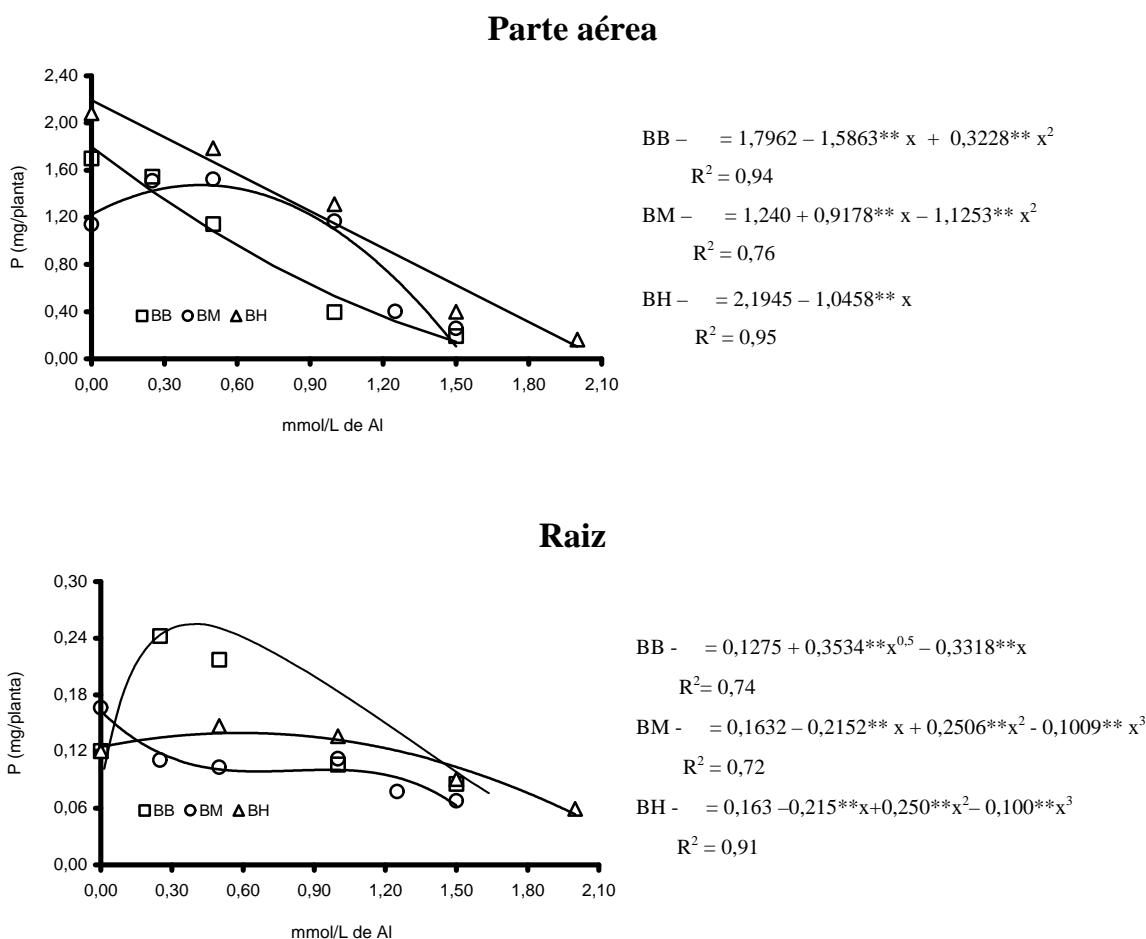


Figura 3 – Conteúdo de fósforo no tecido vegetal de *B.brizantha* cv. Marandú (BB), *B. híbrido* cv. Mulato (BM) e *B. humidicola* (BH) de acordo com as doses de alumínio na solução nutritiva.

O cultivar Mulato comportou-se de modo diferenciado, com um maior acúmulo de P na parte aérea (maior IP) nas menores concentrações de Al (Quadro 4), uma vez que nas outras gramíneas houve tendência ao decréscimo nestes valores. Estimando-se os valores de P na parte aérea, a partir da equação de regressão (Figura 3), pode-se verificar, que não há diferenças nos conteúdos de P na concentração de 0,9 mmol.L⁻¹ de Al (1,104 mg.planta⁻¹ de P) em relação à testemunha, em que as plantas acumularam 1,108 mg.planta⁻¹ de P. O mesmo é verificado quando se observam os valores do IA (Quadro 4); tais resultados evidenciam a capacidade da gramínea manter o status nutricional de fósforo em concentrações abaixo de 1,0 mmol.L⁻¹ de Al em solução nutritiva.

Houve redução nos conteúdos de Mg com o incremento de alumínio na solução nutritiva, de forma semelhante, nas três gramíneas (Figura 4), concordando com a constatação de Haynes (1982) de que a toxidez de alumínio é freqüentemente acompanhada por baixas concentrações de Mg nos tecidos vegetais de diversas espécies. Segundo Martin (1988), ocorre uma competição entre o Al e Mg pelos sítios de absorção na parede celular. Landino & Macdonald (1997) acrescentaram que altas concentrações de Al podem inibir a ativação de proteínas dependentes do Mg, comprometendo o metabolismo e produção de energia nas plantas.

De acordo com os valores dos índices estabelecidos para avaliar a absorção de Mg pelas forrageiras (Quadro 5) verificar se que a *B. humidicola* apresentou maior IA. A *B. brizantha* e a B. híbrido apresentaram IA semelhante, porém fica evidente pelo IP que a B.híbrido acumulou proporcionalmente mais Mg na raiz em relação à parte aérea, assim como a *B. humidicola*.

A variação entre os valores de IP das três forrageiras demonstra que há uma diferença específica em relação à absorção de Mg quando estas são submetidas a elevadas concentrações de Al.

Quadro 4 – Índices de partição do P na planta (IP), de absorção (IA) e o coeficiente de utilização biológica (CUB) em plantas de *B. brizantha* cv. Marandu, *B. humidicola* e *B. híbrido* cv. Mulato, cultivadas em solução com concentração crescentes de Al

Gramínea	Conc. de Al	IP¹	IA²	CUB
	mmol.L ⁻¹	mg.mg ⁻¹	mg.g ⁻¹	g.mg ⁻¹
<i>B. brizantha</i>	0,00	14,08	10,30	0,63
	0,25	6,37	10,72	0,48
	0,50	5,26	8,33	0,53
	1,00	3,72	4,30	1,08
	1,50	2,25	2,47	1,62
<i>B. humidicola</i>	0,00	17,32	35,62	0,49
	0,50	12,16	32,26	0,43
	1,00	9,65	23,82	0,47
	1,50	4,39	12,15	0,92
	2,00	2,72	6,86	1,50
Braquiária híbrido	0,00	6,86	6,53	0,82
	0,30	13,59	10,79	0,55
	0,60	14,72	12,19	0,46
	0,90	10,38	8,93	0,54
	1,20	5,18	3,78	0,93
	1,50	3,80	2,79	1,30

^{1/}Relação entre os conteúdos de Al na parte aérea e raízes das plantas

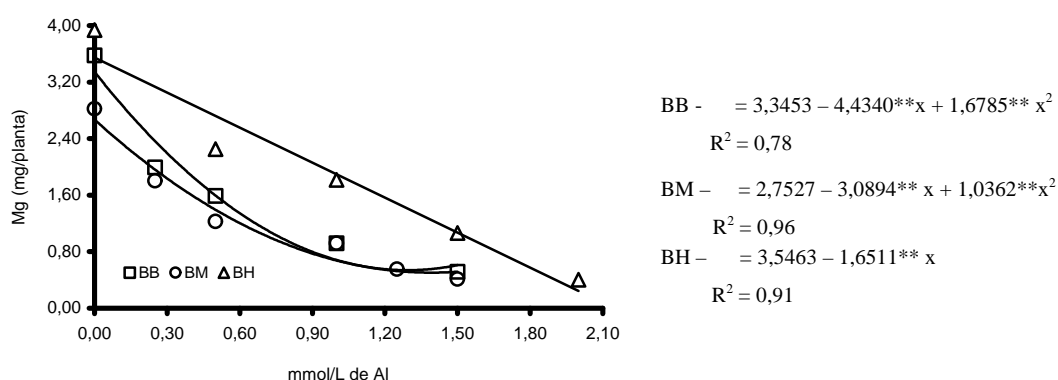
^{2/} Relação entre o conteúdo de Al na parte aérea e a massa radicular

O incremento da concentração de alumínio na solução causou um decréscimo no acúmulo de Ca nos tecidos vegetais nas três gramíneas (Figura 5). Semelhante a Mg, a inibição da absorção de Ca pela presença de altas concentrações de Al no apoplasto é citada por vários autores como efeito primário da toxidez causado pelo Al (Horst, 1995; Blamey & Dowling, 1995). Segundo Marschner (1986) o Al inibi a absorção de Ca, principalmente por meio do bloqueio ou competição pelos sítios de troca. Foy (1984) verificou que a toxicidez por Al pode se manifestar como uma deficiência de Ca induzida, pela redução do transporte do nutriente na planta.

Para Haynes (1982), a toxidez por alumínio é frequentemente acompanhada por baixas concentrações de Ca no tecido das planta e, Grassi Filho (1997) comentaram que a competição de Ca com H em condições de pH baixo pode favorecer a absorção do segundo em detrimento do primeiro.

Observando os valores de IP e IA (Quadro 6), verificou-se que diferentemente dos outros nutrientes, a *B. brizantha* apresentou os maiores valores de IP, indicando que, apesar do menor grau de tolerância, esta espécie apresentou maior capacidade de transporte de Ca a parte aérea. Contudo, as plantas de *B. humidicola* apresentaram maior IA, semelhante a P e Mg (Quadros 4 e 5).

Parte aérea



Raiz

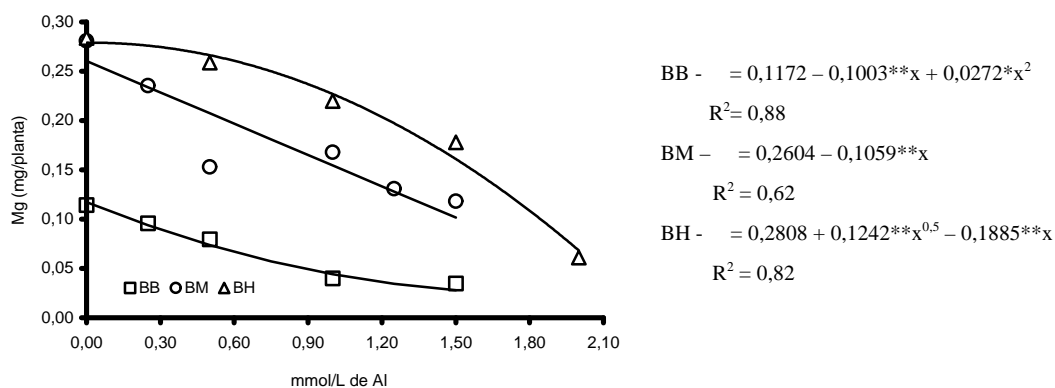


Figura 4 – Conteúdo de magnésio no tecido vegetal de *B. brizantha* cv. Marandu (BB), *B. híbrido* cv. Mulato (BM) e *B. humidicola* (BH) de acordo com as doses de alumínio em solução nutritiva.

Quadro 5 – Índices de partição do Mg (IP), de absorção (IA) e o coeficiente de utilização biológica (CUB) em plantas de *B. brizantha* cv. Marandu, *B. humidicola* e B. híbrido cv. Mulato, cultivadas em soluções com concentrações crescentes de Al

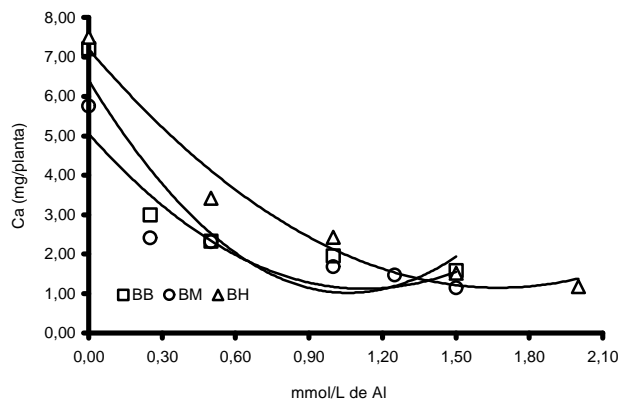
Gramínea	Conc. de Al	IP¹	IA²	CUB
	mmol.L ⁻¹	mg.mg ⁻¹	mg.g ⁻¹	g.mg ⁻¹
<i>B. brizantha</i>	0,00	31,28	20,92	0,31
	0,25	20,81	12,52	0,41
	0,50	19,97	10,23	0,43
	1,00	23,07	8,22	0,56
	1,50	14,87	4,86	0,82
<i>B. humidicola</i>	0,00	13,87	68,25	0,25
	0,50	8,69	41,89	0,33
	1,00	8,27	33,52	0,33
	1,50	5,98	30,77	0,36
	2,00	6,60	14,41	0,71
Braquiária Híbrido	0,00	10,05	15,52	0,34
	0,30	7,66	13,59	0,43
	0,60	8,03	10,36	0,54
	0,90	5,49	7,60	0,64
	1,20	4,21	5,39	0,65
	1,50	3,49	4,55	0,80

^{1/} Relação entre os conteúdos de Al na parte aérea e raízes das plantas

^{2/} Relação entre o conteúdo de Al na parte aérea e a massa radicular

Contudo, é provável que a redução do acúmulo de nutrientes nas plantas também possa ter ocorrido em consequência da própria redução no crescimento das mesmas, devido a alterações provocadas pela presença do alumínio em elevadas concentrações (Silva et al., 2002).

Parte aérea



$$\text{BB} - = 6,6402 - 10,1604**x + 4,7875** x^2$$

$$R^2 = 0,73$$

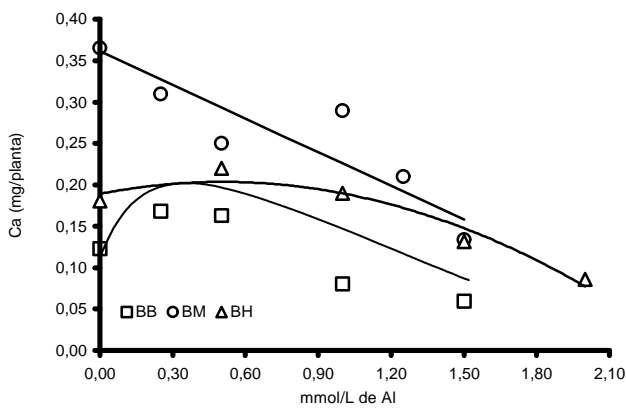
$$\text{BM} - = 5,2265 - 6,8835 ** x + 2,9042**x^2$$

$$R^2 = 0,82$$

$$\text{BH} - = 7,1923 - 7,2311**x + 2,1607** x^2$$

$$R^2 = 0,97$$

Raiz



$$\text{BB} - = 0,1252 + 0,1763**x^{0,5} - 0,1957*x$$

$$R^2 = 0,67$$

$$\text{BM} - = 0,3611 - 0,1352**x$$

$$R^2 = 0,62$$

$$\text{BH} - = 0,9049 + 0,9140**x^{0,5} - 0,8188** x$$

$$R^2 = 0,55$$

Figura 5 – Conteúdo de cálcio no tecido vegetal de *B.brizantha* cv. Marandu (BB), *B. híbrido* cv. Mulato (BM) e *B. humidicola* (BH) de acordo com as doses de alumínio em solução nutritiva.

Quadro 6 – Índices de partição do Ca (IP), de absorção (IA) e o coeficiente de utilização biológica (CUB) em plantas de *B. brizantha* cv. Marandu, *B. humidicola* e *B. híbrido* cv. Mulato, cultivadas soluções com concentrações crescentes de Al

Gramínea	Conc. de Al	IP	IA	CUB
	mmol.L ⁻¹	mg.mg ⁻¹	mg.g ⁻¹	g.mg ⁻¹
<i>B. brizantha</i>	0,00	58,99	41,44	0,15
	0,25	17,80	18,96	0,27
	0,50	14,28	15,26	0,29
	1,00	24,40	17,42	0,26
	1,50	26,74	14,44	0,27
<i>B. humidicola</i>	0,00	41,42	124,07	0,14
	0,50	15,49	60,66	0,23
	1,00	12,74	42,89	0,26
	1,50	11,55	40,75	0,27
	2,00	13,69	38,98	0,26
Braquiária híbrido	0,00	15,73	30,59	0,17
	0,30	7,79	18,16	0,32
	0,60	9,23	19,18	0,29
	0,90	5,79	13,71	0,35
	1,20	6,99	13,25	0,26
	1,50	8,53	10,91	0,33

^{1/} Relação entre os conteúdos de Al na parte aérea e raízes das plantas

^{2/} Relação entre o conteúdo de Al na parte aérea e a massa radicular

4. CONCLUSÕES

Os ensaios permitiram, caracterizar o grau de tolerância de cada gramínea ao Al, estabelecendo a concentração deste elemento na solução, na qual as plantas de cada espécie apresentariam comportamento semelhante, quanto à produção de matéria seca e acúmulo de Al, P, Ca e Mg. A *B. humidicola* apresentou maior grau de tolerância ao alumínio, tendo a *B. brizantha* cv. Marandu apresentado o menor grau entre as três gramíneas e a Braquiária híbrido cv. Mulato um grau de tolerância intermediário.

O B. híbrido apresentou maior capacidade de restrição ao acúmulo de Al no tecido vegetal em comparação às outras gramíneas, tanto nas raízes quanto na parte aérea. Por outro lado, o maior grau de tolerância do *B. humidicola* foi evidenciado pela maior capacidade de acumular Al no tecido vegetal dentro faixa de concentração de Al na solução abaixo daquela estabelecida como crítica.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BLAMEY, F.C.P. & DOWLING, A.J. Antagonism between aluminium and calcium for sorption by calcium pectate. *Plant Soil*, 171:137-140, 1995.
- CLARK, R. B. Characterization of phosphatase of intact maize roots. *J. Agric. Food Chem.*, 23:458-460, 1975.
- CLARKSON, D.T. The effect of aluminium and some other trivalent metal cations on cell division in the root apices of *Allium cepa*. *Ann. Bot.*, 25:309-315, 1965.
- DEFILIPO, B.V. & RIBEIRO, A.C. Análise química do solo (metodologia). Viçosa: UFV, 1996. 17p (Boletim de Extensão, 29)
- ESWARAN, H.; REICH, P. & BEINROTH, F. Global distribution of soils with acidity. In MONIZ A.C.; FURLANI, A.M.C.; SHAFFERT, R.E.; FAGERIA, N.K; ROSOLEM, C.A. & CANTARELLA H. eds. *Plant Soil Interaction at low pH: Sustainable Agriculture and Florestry Production*. Braz. Soil Sci. Society, Campinas/Viçosa, Brazil, 159-164, 1997.
- FOY, C.D. Physiological effects of hydrogen, aluminum and manganese toxicities in acid soil. In: ADAMS, F. ed. *Soil acidity and liming*. 2.ed. Madison. Soil Sci. Society A., 1984. p.57-97.
- FOY, C.D.; DUKE, J.A. & DEVINE, T.E. Tolerance of soybean germoplasm to an acid tatum subsoil. *J. Plant Nutr.*, 15:527-547, 1992.
- FUENTE-MARTINEZ J.M. de la & HERRERA-ESTRELLA L. Advances in understanding of aluminium toxicity and the development of aluminium-tolerant transgenic plants. *Adv. Agron.*, 66:103-120, 1999.

- FURLANI, A.M.C. & FURLANI, P.R. Composição e pH de soluções nutritivas para estudos fisiológicos e seleção de plantas em condições nutricionais adversas. Campinas. IAC. 1988, 121p. (Boletim Técnico)
- GRASSI FILHO, H. Nutrição mineral de plantas. Botucatu: UNESP, Faculdade de Ciências Agronômicas, Departamento e Ciência do Solo, 1997. 133p. (Apostila)
- HAYNES, R.J. Effects of liming on phosphate availability in acid soils. *Plant Soil*. 68:289-308, 1982.
- HELYAR, K.R. Effects of aluminium and manganese toxicity on legume growth. In: ANDREW, C.S. & KAMPRATH, E.J. eds. Mineral nutrition of legumes in tropical and subtropical soils. Melbourne: CSIRO, 1978. p. 207-231.
- HORST, W.J. The role of apoplast in aluminum toxicity and resistance of higher plants. *J. Pflanzenernähr Bodenkd*. 158: 419-428. 1995.
- JAN, F. & PETTERSSON, S. Aluminium sensitivity of two upland rice cultivars at various levels of nutrient supply. *J. Plant Nutr.*, 18:1323-1335, 1995.
- KLIMASHEVSKII, E.L.; MARKOVA, Y.A.; BERNATZKAYA, M.L. & MALYSHEVA, A.S. Physiological responses to aluminium toxicity in root zone of pea varieties. *Agroch.*, 26:487-496, 1972.
- LAZOF, D.B. & HOLLAND, M.J. Evaluation of the aluminium-induced root growth inhibition in isolation from low pH effects in *Glycine max*, *Pisum sativum* and *Phaseolus vulgaris*. *J. Plant Physiol.*, 26:147-157. 1999.
- LÜTTGE, U. & CLARKSON, D.T. Mineral nutrition: aluminium. *Prog. Botany*. 53:63-67, 1992.
- LANDINO, L.M. & MACDONALD, T.L. Inhibition of the GDP/GTP exchange reaction of ras p21 aluminium ion. *J. Inorg. Bioch.*, 66:99-102, 1997.
- MACEDO, C.; KINET, J. M. & SINT JAN, V. VAN. Effects of duration and intensity of aluminum stress on growth parameters in four rice genotypes differing in aluminum sensitivity. *J. Plant Nutr.*, 20:181-193, 1997.
- MARSCHNER, H. Mineral nutrition of higher plants. London: Academic Press, 1986. 674p.

- MARTIN, B.R. Bioinorganic chemistry of aluminium. In: SIGEL H. Metal ions in biological systems. Aluminium and its role in biology. Marcell Dekker, New York. 24:2-138, 1988.
- MATSUMOTO, H.; HIRASAWA, E.; TORIKAY, H. & TAKASHI, E. Localization of absorbed aluminium in pea root and its binding to nucleic acids. *Plant Cell Physiol.*, 17:127-137, 1976.
- McCORMICK, L.H. & BORDEN, F.Y. Phosphate fixation by aluminium in plant roots. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 36: 709-802, 1972.
- McCORMICK, L.N. & BORDEN, F.Y. The occurrence of aluminium phosphate precipitate in plant roots. *Soil Sci. Soc. Proc.*, 38:931-934, 1974.
- NOGUEIRA, S.S.; NAGAI, V.; CARELLI, M.L.C. & FAHL, J.J. Comportamento de porta-enxertos de citros em presença de alumínio. *Pesq. Agropec. Bras.*, 24:711-716, 1989.
- PARKER, D.R.; NORWELL, W.A. & CHANEY, R.L. GEOCHEM-PC: A chemical speciation program for IBM and compatible personal computers. In: LOEPPERT, R.H. ed. *Soil chemical equilibrium and reaction models*. ASA/SSSA, SSSA Special Publication, Madison. 42:253-270, 1995.
- PAVAN, M.A. & BINGHAM, F.T. Toxidez de alumínio em cafeeiros cultivados em solução nutritiva. *Pesq. Agropec. Bras.*, 17:1293-1302, 1982.
- RENGEL, Z. Uptake of aluminium by plant cells. *New Phytol.*, 134:389-406, 1996.
- ROY, A.K.; SHARMA, A. & TALUKDER, G. A time-course study on effects of aluminium on mitotic cell division in *Allium sativum*. *Mutation Res.* 227:221-226. 1989.
- SANTOS, M. de L.M. Estudo dos mecanismos de tolerância ao alumínio e sua variabilidade genotípica em arroz (*Oryza sativa* L.). Seropédica, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 1991.176 p. (Tese de Mestrado)
- SILVA, I.R.; SMYTH, T.J.; BARROS, N.F. & NOVAIS, R.F. Physiological aspects of aluminium toxicity and tolerance in plants. In: ALVARES V. V.H.; SCHAEFER, C.E.G.R.; BARROS, N.F.; MELLO, J.W.V. & COSTA, L.M. eds. *Tópicos em Ciência do Solo vol II*, Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2002. 277-316.

- SIQUEIRA, C. Calagem para plantas forrageiras. In: Calagem e adubação de pastagens. Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato. Piracicaba, 1986. p.77-91.
- VASCONCELLOS, S.S; ROSSIELLO, R.O.P. & JOCOB-NETO, J. Parâmetros morfológicos para estabelecer tolerância diferencial à toxicidade de alumínio em cultivares de arroz. Pesq. Agropec. Bras., 37:357-363, 2002.
- VELOSO, C. A. C; MALAVOLTA, E.; MURAOKA, T. & CARVALHO, E. J. M. Alumínio e a absorção de cálcio por mudas de pimenta do reino. Sci. Agríc., 57:141-145, 2000.
- VICENTE, F. M. P.; ROSSIELLO, R. O. P. & PEREIRA, M. B. Características indicativas de sensibilidade ao alumínio em arroz. I. Crescimento em solução nutritiva. Pesq. Agropec. Bras., 33:9-15, 1998.
- WHITE, R.E. Studies on mineral ion absorption by plants. III The interactions of aluminium, phosphate and pH on the growth of *Medicago sativa*. Plant Soil, 46:195-208, 1976.
- WILLIAMS, R.J.P. What is wrong with aluminium? The J.D. Birchall memorial lecture. J. Inorg. Biochem., 76:81-88, 1999.
- WRIGHT, R.J. Soil aluminium toxicity and plant growth. Comm. Soil Sci. Plant Anal, 20:1479-1497. 1989.

CAPÍTULO 2

ABSORÇÃO DE NITRATO E AMÔNIO POR DUAS GRAMÍNEAS FORRAGEIRAS, EXPOSTAS AO ALUMÍNIO E À DEFICIÊNCIA DE FÓSFORO.

RESUMO

O adequado suprimento de N a gramíneas forrageiras é condição fundamental para o aumento em quantidade e qualidade da biomassa produzida. A resposta efetiva dessas gramíneas ao N aplicado é dependente da baixa concentração de Al e, por outro lado, da alta disponibilidade de P nos solos. O objetivo deste trabalho foi caracterizar a absorção de nitrato e amônio por gramíneas com diferentes graus de tolerância à acidez, quando expostas ao alumínio e à deficiência de fósforo. Foram testadas as espécies *Brachiaria brizantha* cv. Marandu e *Brachiaria humidicola*, identificadas em ensaio anterior como de menor e maior tolerância ao alumínio, respectivamente. As cinéticas de absorção do nitrato (N-NO₃⁻) e do amônio (N-NH₄⁺) foram determinadas por meio da técnica de exaustão destes íons na solução nutritiva. Para isto, foram realizados dois ensaios para a estimativa dos parâmetros cinéticos de absorção do nitrato e amônio: I_{max}, K_m e C_{min}, no primeiro ensaio estabeleceu-se a cinética de absorção pelas plantas em solução nutritiva com as relações NO₃⁻:NH₄⁺ 1:0 e 1:1, nos tratamentos (Sem Al e com exposição à concentração crítica de Al por 24 e 72h), e outro em que as plantas foram submetidas a um período de quatro dias de omissão de P e expostas à solução com alumínio por 24h. A *Brachiaria humidicola*, de modo geral, apresentou maior absorção do nitrato e amônio, caracterizada por maiores valores de I_{max} com menores valores de K_m e C_{min}, em todos os

tratamentos quando comparada a *Brachiaria brizantha* cv. Marandu. Para a *B. brizantha* cv. Marandu a exposição ao Al causou maior redução nos valores de I_{max} e aumento de K_m , quando ele foi a única fonte de N, enquanto que para a *B. humidicola* este efeito foi maior quando o nitrato foi fornecido juntamente com o amônio. O aumento dos valores de k_m e C_{min} da cinética de nitrato para as duas gramíneas quando submetidas a altas concentrações de Al e, ou, baixa disponibilidade de P, revelam uma redução na afinidade do sistema pela absorção deste íon e interrupção da absorção mesmo quando este íon estiver presente em altas concentrações, o que poderia ocasionar prováveis perdas de nitrato para o ambiente.

1. INTRODUÇÃO

A maior parte do Cerrado brasileiro está localizada na Região Centro-Oeste, onde as pastagens cultivadas representam, segundo estimativas, cerca de 45 a 50 milhões de hectares. Essas áreas, na sua maioria, possuem solos ácidos, com elevados teores de alumínio trocável e baixa fertilidade natural. Embora a baixa fertilidade seja um fator limitante para a produtividade, as perspectivas para a pecuária no Cerrado são promissoras devido, em parte, à disponibilidade de recursos forrageiros com ampla tolerância ao alumínio trocável e adaptação à baixa fertilidade.

A disponibilidade de fósforo é importante para o estabelecimento do pasto e a de nitrogênio é fundamental para a obtenção de altas produtividades (Lira, 1994). As plantas absorvem nitrogênio na forma de nitrato e amônio, sendo que a maioria das plantas apresenta maiores taxas de crescimento quando supridas com as duas formas de nitrogênio (Vale et al., 1998). Geralmente, em condições ácidas, pode haver predominância da forma amoniacal (Coelho, 1995). Contudo, há evidências de elevados teores de nitrato em solos tropicais ácidos, o que pode ser atribuído à capacidade nitrificante de microrganismos heterotróficos (Adams, 1986), à utilização de adubo nitrogenado nítrico, ou ainda à maior atividade de microrganismos nitrificantes devido à correção da acidez.

Segundo Magalhães (1996), a disponibilidade de fósforo compromete mais a absorção de nitrato do que a de amônio. Desta forma, em solos tropicais as plantas poderão sofrer deficiência de nitrogênio, sobretudo se houver predominância de nitrato, uma vez que elas estão sujeitas a deficiência de fósforo de forma contínua, devido à baixa disponibilidade ou de forma esporádica devido ao déficit hídrico, que compromete a difusão do fósforo (Novais & Smyth, 1999).

Altos teores de alumínio afetam o crescimento e desenvolvimento do sistema radicular (Foy et al., 1992) e a nutrição das plantas, afetando, entre outras a absorção de nitrato (Calba & Jaillard, 1997). Rufty et al. (1995) observaram redução no influxo de nitrato em plantas de soja com o aumento da concentração de Al na solução nutritiva de 10 para 50 μmolL^{-1} . Calba & Jaillard (1997) relataram uma redução do influxo de Cl^- e NO_3^- em milho, enquanto Grauer & Horst (1990) observaram que o maior influxo de nitrato resulta no aumento do pH na rizosfera, mesmo com o efeito depressivo do Al no crescimento radicular. A absorção de amônio também é afetada por altas concentrações de alumínio. Logan et al. (2000), por meio da variação do pH na rizosfera em gramíneas, observaram o efeito do alumínio no aumento do influxo de NH_4^+ e exsudação de H^+ pelo sistema radicular, como forma de manutenção do potencial elétrico da membrana plasmática.

Diante dos efeitos depressivos do Al na absorção das diferentes formas de nitrogênio, torna-se necessário maior conhecimento sobre a nutrição de plantas adaptadas às condições de alta acidez e baixa disponibilidade de P. Espera-se que plantas com mecanismos fisiológicos de tolerância ao Al, apresentem maior capacidade de absorção de amônio. Gahoonia et al. (1992) revelaram que a acidificação da rizosfera induzida pela absorção de amônio não altera, ou até diminui, a disponibilidade de fósforo ligado a Fe e Al, que representam as principais formas de fósforo adsorvido ou precipitado em solos tropicais (Novais & Smyth, 1999). Assim, plantas adaptadas a ambientes ácidos devem apresentar necessariamente alta eficiência na aquisição e utilização de fósforo (Foy et al., 1992).

O presente trabalho teve como objetivo caracterizar a absorção de nitrato e amônio por gramíneas forrageiras com diferentes graus de tolerância ao alumínio, quando expostas ao alumínio e à deficiência de fósforo.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Os experimentos foram conduzidos em casa de vegetação e câmara crescimento do Departamento de Solos-UFV. Foram escolhidas as espécies *Brachiaria brizantha* cv. Marandu e *Brachiaria humidicola*, identificadas como menos e mais tolerantes ao alumínio, respectivamente.

2.1 - Absorção de NO_3^- e NH_4^+ pelas plantas expostas ao Al

As cinéticas de absorção do nitrato (N- NO_3^-) e do amônio (N- NH_4^+) pelas plantas foram determinadas por meio da técnica de exaustão destes íons na solução nutritiva (Claassen & Barber, 1974).

Plântulas de cada gramínea, obtidas conforme descrito no capítulo anterior, foram cultivadas em casa de vegetação por 18 dias em caixas com 30 L de solução nutritiva segundo Clark et al. (1975) modificada, com 50% de sua concentração original. Durante esse período a solução foi continuamente arejada e o pH foi mantido em $4,0 \pm 0,2$ por meio da adição de NaOH ou de HCl 1 mol.L⁻¹. A partir do décimo nono dia um grupo de plantas foi mantido nesta solução e outro grupo foi transferido para a mesma solução contendo 0,7 mmol L⁻¹ de Al para *B. brizantha* e 1,3 mmol L⁻¹ para a e *B. humidicola*, onde permaneceram por 24 ou 72 h, até o início do ensaio de exaustão.

Quarenta e oito horas antes do início do ensaio de exaustão, as plantas foram transferidas para a câmara de crescimento com fotoperíodo de 12 h e temperatura média de 25 °C. Uma hora antes as plantas foram transferidas para solução de CaCl_2 $0,5 \mu\text{mol L}^{-1}$ para estabilização (Baptista et al., 2000). O ensaio de exaustão foi conduzido em vaso com 1,2 L de solução de CaCl_2 $0,5 \mu\text{mol L}^{-1}$, contendo $100 \mu\text{mol L}^{-1}$ de N- NO_3^- (NaNO_3), ou $100 \mu\text{mol L}^{-1}$ de N- NO_3^- mais $100 \mu\text{mol L}^{-1}$ de N- NH_4^+ (NH_4Cl). Foi utilizada uma planta por vaso, proveniente de cada condição de pré-exposição ao Al. O pH inicial foi de 4,0 e durante o ensaio a solução foi continuamente arejada.

Assim, os tratamentos consistiram da combinação fatorial entre as três condições de pré-exposição das plantas ao Al (sem exposição, e exposição por 24 e 72 h) e duas relações $\text{NO}_3^-:\text{NH}_4^+$ (1:0 e 1:1), sendo as forrageiras consideradas ensaios independentes. O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, com três repetições.

O ensaio de exaustão consistiu da coleta de alíquotas de 5 mL por vaso a cada 30 min durante 10 h e uma alíquota 24 h após o início do ensaio. Os vasos foram pesados no início e final do ensaio para estimar o volume de água perdida por evapotranspiração. Ao final, as plantas foram coletadas, separadas em raiz e parte aérea, lavadas com água deionizada e tomou-se o peso das raízes frescas. Os materiais da parte aérea e das raízes foram secos em estufa (65° C) com circulação forçada de ar por 72 h e posteriormente moídos (< 1mm).

As alíquotas de solução foram mantidas em geladeira até a dosagem do N- NO_3^- e N- NH_4^+ . Ambos foram dosados colorimetricamente, sendo o N- NO_3^- pelo método descrito por Yang et al.(1998), e o N- NH_4^+ pelo método descrito por Kempers & Zweers (1986). No material vegetal após a digestão nitro-perclórica, determinaram-se os teores de Al por meio de espectrometria de emissão atômica em plasma induzido.

Por meio das variações nas quantidades de NO_3^- e NH_4^+ na solução e a massa de raiz fresca das plantas, calculou-se o influxo de N nas respectivas formas ($\mu\text{mol.g}^{-1}$). A partir da relação entre o influxo e as concentrações de N-

NO_3^- e N-NH_4^+ na solução estabeleceu-se a cinética descrita pela equação Michaelis-Mentem, estimando-se os parâmetros influxo máximo (I_{max}) e K_m pelo método gráfico-matemático (Ruiz, 1985) empregando o software Cinética (Ruiz & Fernandes Filho, 1992). O parâmetro C_{min} foi estabelecido por interpolação gráfica (Ruiz, 1985). O I_{max} caracteriza a taxa de influxo máximo do N-NO_3^- e N-NH_4^+ enquanto o K_m indica a concentração na qual se obtém a metade do I_{max} , que se relaciona à afinidade dos sistemas de absorção por estes íons. O C_{min} caracteriza as concentrações do N-NO_3^- e N-NH_4^+ na solução na qual o influxo é igual ao efluxo, ou seja, acima da qual as plantas apresentam influxo líquido positivo. Os parâmetros da cinética foram estimados por repetição, o que possibilitou a análise de variância, sendo as comparações feitas por meio de contrastes ortogonais.

2.2 - Absorção de NO_3^- e NH_4^+ pelas plantas pré-expostas à solução com Al e à ausência de P

Plantas de cada gramínea foram cultivadas por 18 dias em casa de vegetação, conforme descrito no ensaio anterior. No décimo nono dia um grupo de plantas foi submetido por 96 h à solução nutritiva de Clark et al. (1975) modificada, sem fósforo e outro grupo foi mantido na solução completa. Quarenta e oito horas antes do início do ensaio de exaustão as plantas foram transferidas para a câmara de crescimento com fotoperíodo de 12 h e temperatura média de 25° C. Durante as vinte e quatro horas que antecederam ao ensaio de exaustão metade das plantas com e sem a omissão de fósforo, foram expostas a 0,7 mmol L⁻¹ de Al para a *B. brizantha* e 1,3 mmol L⁻¹ para *B. humidicola* e a outra metade não foi exposta ao Al.

Deste modo os tratamentos consistiram da combinação fatorial entre duas condições de pré-tratamento com P (com e sem omissão) e duas condições de exposição ao Al (com e sem), sendo as forrageiras consideradas como ensaios independentes. O delineamento experimental foi inteiramente casualizado com três repetições.

Uma hora antes do início do ensaio de exaustão as plantas foram transferidas para solução de CaCl_2 $0,5 \mu\text{mol L}^{-1}$ para estabilização (Baptista et al., 2000). O ensaio de exaustão foi conduzido em vasos com 1,2 L da solução de CaCl_2 $0,5 \mu\text{mol L}^{-1}$ com $100 \mu\text{mol L}^{-1}$ de N-NO_3^- (NaNO_3) e $100 \mu\text{mol L}^{-1}$ de N-NH_4^+ (NH_4Cl). Foi utilizada uma planta por vaso proveniente de cada pré-tratamento com P e exposição ao Al. O pH inicial da solução foi de 4,0 e a solução foi continuamente arejada.

O procedimento de amostragem da solução, a dosagem do N-NO_3^- e N-NH_4^+ , a coleta e processamento das plantas foram os mesmo descritos no ensaio anterior. No material vegetal dosou-se, além do Al, fósforo, o que foi feito colorimetricamente segundo Defilipo & Ribeiro (1996).

A partir do influxo e das concentrações de N-NO_3^- e N-NH_4^+ na solução foram estimados os parâmetros I_{max} , K_m e C_{min} conforme descrito anteriormente. A estimativa dos parâmetros por repetição possibilitou a análise de variância e as comparações de interesse por meio de contrastes.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 - Absorção de NO_3^- e NH_4^+ pelas plantas expostas ao Al

Acúmulo de Al na raiz

Os aumentos nos conteúdos de Al nas raízes das plantas com a exposição ao Al foram significativos. Para a *B. brizantha* os conteúdos médios foram 0,1193; 0,5019 e 1,6769 mg de Al por planta nos tratamentos sem Al e com exposição por 24 e 72 h à solução com Al, respectivamente. Para a *B. humidicola* estes conteúdos foram, respectivamente, 0,2174; 0,7444 e 1,7875 mg.

Os maiores conteúdos de Al nas raízes da *Brachiaria humidicola* podem ser atribuídos, em parte, à maior concentração de Al utilizada e à característica de maior tolerância ao Al. Apesar do acúmulo de alumínio nas raízes não foram observadas alterações morfológicas perceptíveis tais como, escurecimento e atrofiamento de raízes, que são sintomas característicos de toxidez causada por elevadas concentrações de Al.

Cinética de absorção do N-NO_3^- e N-NH_4^+

Os parâmetros cinéticos da absorção de N-NO_3^- e N-NH_4^+ obtidos para as duas espécies estão apresentados no Quadro 1. Segundo Ruiz et al. (1987) há uma variação inversa entre os parâmetros, I_{max} e K_m , sendo que maiores valores de I_{max} indicam maior afinidade da planta por determinado nutriente o que se expressa por menores valores de K_m . Vale et al. (1984), no entanto, ressaltam que a menor afinidade expressa pelo alto K_m pode ser compensada por uma maior capacidade de transporte, resultando em maior I_{max} . Assim, sob estresse de Al nas condições deste ensaio, a combinação de altos valores de I_{max} e baixos valores de K_m e C_{min} podem caracterizar uma maior absorção de nitrato ou amônio, em altas concentrações destes íons, á exemplo da constatação de Anghinoni et al. (1989) e Baptista et al. (2000).

Observaram-se maiores valores de I_{max} para a absorção de nitrato pela *B. humidicola*, no entanto as diferenças entre os valores de K_m e C_{min} das duas gramíneas foram menores, sobretudo quando expostas ao Al por 72 h (Quadro 1). Vilela & Anghinoni (1984) observaram que variações no I_{max} refletiram melhor a absorção por unidade de raiz do que as variações no K_m . A mesma tendência foi verificada para os parâmetros da cinética do amônio (Quadro 1). No entanto, Castilla & Jackson, citados por Rao et al. (1996) verificaram que *B. humidicola* absorveu quantidades nitrato e amônio semelhantes, enquanto a *B. brizantha* absorveu menores quantidades de amônio do que nitrato.

A variação do C_{min} seguiu a mesma tendência de variação do K_m , tanto para nitrato como para amônio, ressaltando-se que os valores destes parâmetros tenderam a se aproximar quando se intensificou o estresse causado pelo Al. Considerando o tratamento com relação $\text{NO}_3^-:\text{NH}_4^+$ (1:1), a que mais se aproxima da condição real no solo, estas tendências se confirmam, exceto para o *B. brizantha* quando exposto ao Al por 24 h, em que verificou-se menor I_{max} e menores valores de K_m e C_{min} . Assim, de forma geral, os

Quadro 1 – Estimativa para os parâmetros I_{max}, K_m e C_{mim} da cinética de absorção de N-NO₃⁻ e N-NH₄⁺ por *B. brizantha* cv. Marandu e *B. humidicola* em solução com duas relações NO₃⁻:NH₄⁺ sem e com exposição das plantas à solução com alumínio^{1/} por dois períodos de tempo, e os contrastes estabelecidos e suas significâncias

Forma de N	Relação NO ₃ ⁻ :NH ₄ ⁺	Exposição à sol. Com Al	Contraste	I _{max} μmol.g ⁻¹ h ⁻¹	K _m μmol.L ⁻¹	C _{mim}
<i>B. Brizantha</i>						
N-NO ₃ ⁻	1:0	Sem Al		11,757	30,553	9,327
	1:0	Com Al por 24h		9,280	30,493	9,927
	1:0	Com Al por 72h		3,707	49,383	39,547
			C1	**	**	
			C2	**	**	
N-NO ₃ ⁻	1:1	Sem Al		6,087	23,653	10,667
	1:1	Com Al por 24h		5,623	21,893	9,527
	1:1	Com Al por 72h		5,760	51,547	38,283
			C1	**	**	
			C2	ns	**	
N-NH ₄ ⁺	1:1	Sem Al		7,679	20,533	7,450
	1:1	Com Al por 24h		5,012	39,603	26,683
	1:1	Com Al por 72h		5,276	48,287	38,023
			C1	**	**	
			C2	*	**	
<i>B. humidicola</i>						
N-NO ₃ ⁻	1:0	Sem Al		20,587	24,247	9,810
	1:0	Com Al por 24h		13,402	26,353	12,770
	1:0	Com Al por 72h		11,709	50,873	39,937
			C1	**	**	
			C2	**	**	
N-NO ₃ ⁻	1:1	Sem Al		16,902	25,060	10,207
	1:1	Com Al por 24h		14,523	41,147	26,603
	1:1	Com Al por 72h		11,319	51,167	41,050
			C1	**	**	
			C2	*	**	
N-NH ₄ ⁺	1:1	Sem Al		12,345	27,550	13,790
	1:1	Com Al por 24h		11,552	38,997	28,053
	1:1	Com Al por 72h		9,412	50,810	39,690
			C1	**	**	
			C2	**	**	

^{1/} Concentrações de 0,7 e 1,3 mmol L⁻¹ de Al para *B. brizantha* e *B. humidicola*, respectivamente.

C1 = 2 (Sem Al) – (Com Al por 24 h + Com Al por 72 h)

C2 = (Com Al por 24 h) – (Com Al por 72 h)

** , * e ^{ns}: significativos a 1%, 5% e não significativos pelo teste F, respectivamente.

resultados sugerem que a *B. humidicola* apresenta um maior potencial de absorção tanto para NO₃⁻ como NH₄⁺ que a *B. brizantha*.

Os valores de I_{max} , K_m e C_{min} encontrados para as duas espécies foram bastante semelhantes aos obtidos para milho e eucalipto (Vale et al., 1984) e superiores aos obtidos para sorgo (Bonato et al., 2000). Os valores de K_m e C_{min} foram semelhantes àqueles verificados por Baptista et al. (2000) para a cinética de absorção de nitrato por arroz, no entanto os valores de I_{max} foram inferiores. Contudo, deve-se ressaltar, que I_{max} , K_m e C_{min} podem variar consideravelmente, entre espécies ou mesmo entre cultivares, com o estágio de desenvolvimento das plantas e com a concentração do íon na solução de absorção (Jensen & Konig, 1982; Bonato et al, 2000).

Para avaliar o efeito da exposição ao Al sobre a cinética de absorção do nitrato e amônio pelas plantas, foram estabelecidos contrastes ortogonais entre os valores médios dos parâmetros I_{max} e K_m .

De acordo com a significância dos contrastes C1 e C2 (Quadro 1) a diminuição de I_{max} e aumento de K_m , com a exposição das plantas ao Al, sugerem que a absorção do nitrato pode ter sido comprometida. Embora estas variações tenham ocorrido nas duas relações $N-NO_3^-:N-NH_4^+$, elas foram mais expressiva na relação 1:0, em que a redução no I_{max} , devido a exposição ao Al por 24 e 72 h, foi de 21 e 68% para *B. brizantha* e 34 e 43% para *B. humidicola*, respectivamente. Na relação 1:1, estes percentuais foram de 7 e 5% para *B. brizantha* e 14 e 33% para *B. humidicola*.

Quando o nitrato foi a única fonte de N, a *B. brizantha* experimentou maior redução no I_{max} (68%) do que o *B. humidicola* (43%), apesar de a exposição a menor concentração de Al (0,7 mmol L⁻¹). Por outro lado, a menor redução no I_{max} (21%) para a *B. brizantha*, verificado com a exposição ao Al por 24 h, pode ser atribuída ao fato do Al em baixas concentrações ocupar os sítios de absorção na parede celular, aumentando a eletropositividade das raízes e, por conseguinte, a afinidade por ânions, dentre eles o NO_3^- , conforme constatou Foy (1974).

Os contrastes C1, C2 e C3 (Quadro 2) evidenciam o efeito do estresse causado pelo Al sobre os parâmetros da cinética de absorção de nitrato pelas plantas submetidas às duas relações $NO_3^-:NH_4^+$.

A significância do contraste C1 e C3 (Quadro 2) e a tendência da variação dos parâmetros I_{max} e K_m sugerem que a *B. humidicola* apresentou maior absorção do nitrato quando este foi a única fonte de nitrogênio.

A *B. brizantha* apresentou maior I_{max} na relação $NO_3^-:NH_4^+$ 1:0 quando não exposta ao Al (Quadro 2 – contraste C1) e na relação 1:1 quando exposta ao Al por 72 horas (Quadro 2 – contraste C3). Estas variações de I_{max} poderiam caracterizar maior absorção de nitrato, porém os valores de K_m foram significativamente maiores, indicando menor afinidade do sistema por este íon. Sob condições de estresse, com a exposição ao Al, o maior gasto de energia, para a polarização da membrana plasmática ou manutenção de processos enzimáticos, favorece a absorção de amônio que demanda menos energia, de acordo com Glass & Siddiqi (1995). A *B. brizantha*, que aparenta menor absorção de nitrato, provavelmente, a própria absorção de amônio gerou um saldo energético que condicionou uma menor perda de afinidade por este ânion. Este saldo energético condicionaria a manutenção da atividade na nitrato redutase e o transporte do nitrato para parte aérea, que são fundamentais para diminuir a concentração interna nas células das raízes, um dos fatores que determina o fluxo de absorção (Siddiqi et al., 1989).

Os parâmetros cinéticos (Quadro 1) sugerem que a exposição ao Al causou menor efeito à cinética de absorção de NH_4^+ . No entanto, para as duas forrageiras o I_{max} diminuiu e o K_m aumentou significativamente com a exposição ao Al (Quadro 1 – contrastes C1 e C2), o que condicionaria a menor absorção. A redução no I_{max} devido à exposição ao Al por 24 e 72 h foi de 34 e 31% para *B. brizantha* e 6 e 24% para *B. humidicola*, respectivamente.

De acordo com as variações de I_{max} e K_m para a *B. humidicola* quando exposta ao Al (Quadro 1), verificou-se as maiores reduções no I_{max} para o nitrato, apesar destes se manterem elevados, ou seja, ainda maiores que os valores para a *B. brizantha*. Tal fato pode indicar maior absorção sob alta disponibilidade de nitrato pela *B. humidicola*. De fato, o maior I_{max} e menor K_m sugerem maior de absorção de nitrato pela *B. humidicola* não exposta ao

Quadro 2 – Contrastes ortogonais e seus respectivos valores para os parâmetros I_{max} e K_m, relativos a absorção de N-NO₃⁻ por *B. brizantha* cv. Marandu e *B. humidicola* em solução nutritiva com duas relações NO₃⁻:NH₄⁺ após exposição das plantas à solução com alumínio^{1/} em dois períodos de tempo, entre as duas relações NO₃⁻:NH₄⁺

Exposição à sol. com Al	Contrastes	Valores	
		I _{max}	K _m
<i>B. brizantha</i>			
Sem Al	C1	5,67 *	6,90**
Com Al por 24h	C2	3,65 ^{ns}	8,60**
Com Al por 72h	C3	-2,05 *	-2,16**
<i>B. humidicola</i>			
Sem Al	C1	3,68**	-0,81**
Com Al por 24h	C2	-1,12 ^{ns}	-14,79**
Com Al por 72h	C3	0,39 *	-0,29**

** , * e ^{ns}: significativos a 1%, 5% e não significativos pelo teste F, respectivamente.

C1, C2 e C3 = (NO₃⁻ em rel. 1:0) – (NO₃⁻ em rel. 1:1)

^{1/} Concentrações de 0,7 e 1,3 mmol L⁻¹ de Al para *B. brizantha* e *B. humidicola*, respectivamente.

Al. Quando exposta ao Al por 72 h esta tendência é evidenciada apenas pelo I_{max}, que foi significativa maior que para nitrato, o que pode estar associado a um sistema eficiente de transporte do nitrato para a parte aérea, como sugerem Vale et al. (1984). De acordo com o valor de C_{min} ressalta-se que nesta condição a forrageira apresentaria um influxo igual ao efluxo em uma concentração próxima ao valor de K_m, que condicionaria maior lixiviação de nitrato já que não haveria absorção pelas plantas.

Para a *B. brizantha* esta perda de afinidade foi mais evidente para o amônio, já que os valores de I_{max} de nitrato e amônio para *B. brizantha* não diferem estatisticamente entre si independente da condição de estresse causada pelo Al. Porém os valores variação do K_m evidenciam que o sistema de absorção desta espécie tem maior afinidade pelo amônio, independente da condição de estresse.

3.2 – Absorção de NO_3^- e NH_4^+ pelas plantas pré-expostas ao Al e ausência de P

Acúmulo de alumínio e fósforo

Semelhante ao ensaio anterior o acúmulo de Al no tecido radicular das plantas expostas ao Al foi significativamente maior (Quadro 3 – contraste C1).

Observou-se queda significativa no conteúdo de P nas plantas submetidas à omissão de P, tanto na parte aérea como no sistema radicular (Quadro 3 – contraste C2). Na *B. brizantha* esta redução foi de 36 e 39% na raiz e parte aérea, respectivamente, enquanto que para a *B. humidicola* esta foi de 62 e 45%. Estas variações estão de acordo como os resultados obtidos por Magalhães (1996) e Alves (1994), que observaram redução de cerca de 50% nos conteúdos de P em plantas de milho após quatro dias de omissão do elemento na solução.

Cinética de absorção do N- NO_3^- e N- NH_4^+

A *B. humidicola* também neste ensaio apresentou, de modo geral, maiores valores de I_{max} em relação a *B. brizantha*, sugerindo maior absorção sob altas concentrações de nitrato e amônio na solução. Verificou-se menor variação nos valores de K_m e C_{min} na cinética de absorção de nitrato e amônio entre as duas espécies (Quadro 4).

Verificou-se com as duas espécies, tanto para nitrato como para amônio, queda nos valores de I_{max} nos tratamentos com exposição ao Al, sendo mais expressiva quando aliada à omissão de fósforo (Quadro 4), e o aumento de K_m , que evidencia a redução da afinidade do sistema de absorção das plantas por estes íons. Assim, foi verificada uma redução significativa em I_{max} e aumento de K_m na absorção do nitrato nas duas gramíneas, tanto quando as plantas sofreram omissão de P (Quadro 4 – contraste C1) como quando foram expostas à solução com Al (Quadro 4 – contraste C2).

Quadro 3 – Valores médios dos conteúdos de Al e P no tecido vegetal de *B. brizantha* cv. Marandu e *B. humidicola* de plantas submetidas a tratamentos com períodos de omissão ou não de P e à solução com alumínio^{1/} e significância de seus contrastes

Omissão de fósforo	Exposição a alumínio	Contrastes	Al Raiz	P	
				Raiz	Parte Aérea
mg.planta ⁻¹					
<i>B. brizantha</i>					
Com P	Sem Al		0,255	0,216	2,083
	Com Al		0,683	0,255	2,285
Sem P	Sem Al		0,224	0,145	1,307
	Com Al		0,771	0,154	1,350
		C1	**		
		C2		**	**
<i>B. humidicola</i>					
Com P	Sem Al		0,367	1,297	2,148
	Com Al		0,416	1,396	1,837
Sem P	Sem Al		0,724	0,493	1,093
	Com Al		0,820	0,522	1,089
		C1	**		
		C2		**	**

^{1/} Concentrações de 0,7 e 1,3 mmol L⁻¹ de Al para *B. brizantha* e *B. humidicola*, respectivamente.

C1 = (Com P Com Al + Sem P Com Al) – (Com P Sem Al + Sem P Sem Al)

C2 = (Com P Com Al + Com P Sem Al) – (Sem P Sem Al + Sem P Com Al)

**, * e ^{ns}: significativos a 1%, 5% e não significativos pelo teste F, respectivamente.

A redução percentual dos valores de I_{max} de nitrato em relação à exposição ou não ao alumínio foi de 35% e 41% para *B. brizantha* e *B. humidicola*, respectivamente, enquanto que, com a omissão de P a redução foi de 32% e 54% para *B. brizantha* e *B. humidicola*, respectivamente. Assim, estes valores evidenciaram que para a *B. humidicola* a maior redução percentual do I_{max} (NO₃⁻) foi ocasionada pela omissão de P, enquanto que para a *B. brizantha* foi à exposição ao Al.

O decréscimo na taxa de absorção de nitrato em condições de deficiência de fósforo é relatado para colza, cevada e trigo (Schjorring, 1986), tabaco (Rufty Jr. et al., 1990), e cevada (Lee, 1982; Rufty Jr. et al., 1991). Schjorring (1986) observou redução na absorção de nitrato causado pela deficiência de fósforo, tanto quando o nitrato era a única fonte de nitrogênio quanto na presença de nitrato e amônio.

Quadro 4 – Estimativa dos parâmetros I_{max}, K_m e C_{min} da cinética de absorção de N-N₃⁻ e N-NH₄⁺ por *B. brizantha* cv. Marandu e *B. humidicola* de plantas submetidas a tratamentos com períodos de omissão ou não de P e à solução com alumínio^{1/}, e a significância de seus contrastes

Forma de N	Omissão de fósforo	Exposição a alumínio	Contrastes	I _{max} μmol.g ⁻¹ h ⁻¹	K _m μmol.L ⁻¹	C _{min}
<i>B. brizantha</i>						
N-NO ₃ ⁻	Com P	Sem Al		5,99	22,16	11,35
		Com Al		3,85	26,68	10,68
	Sem P	Sem Al		4,05	43,62	31,61
		Com Al		2,75	67,33	58,94
			C1	**	**	
			C2	**	**	
N-NH ₄ ⁺	Com P	Sem Al		4,67	21,79	8,89
		Com Al		4,49	29,99	15,21
	Sem P	Sem Al		3,53	40,47	27,99
		Com Al		3,99	53,63	45,43
			C1	**	**	
			C2	ns	**	
<i>B. humidicola</i>						
N-NO ₃ ⁻	Com P	Sem Al		18,09	25,82	10,89
		Com Al		10,59	44,12	33,76
	Sem P	Sem Al		8,21	43,04	30,68
		Com Al		6,73	66,41	56,68
			C1	**	**	
			C2	**	**	
N-NH ₄ ⁺	Com P	Sem Al		14,17	23,94	10,33
		Com Al		9,03	28,62	17,02
	Sem P	Sem Al		10,09	37,16	26,76
		Com Al		7,77	47,61	38,63
			C1	ns	**	
			C2	*	**	

^{1/} Concentrações de 0,7 e 1,3 mmol L⁻¹ de Al para *B. brizantha* e *B. humidicola*, respectivamente.

C1 = (Com P Com Al + Com P Sem Al) – (Sem P Sem Al + Sem P Com Al)

C2 = (Com P Com Al + Sem P Com Al) – (Com P Sem Al + Sem P Sem Al)

**, * e ^{ns}: significativos a 1%, 5% e não significativos pelo teste F, respectivamente.

A concentração externa de 100 molL⁻¹ de NO₃⁻ utilizada neste experimento está dentro da faixa de atividade do sistema de alta afinidade, que depende de energia metabólica (Glass et al., 1990). Em plantas de soja, a redução de 15% nos níveis de ATP devido à omissão de fósforo por dois dias provocou redução no influxo de nitrato (Rufy Jr. et al., 1993). Tanto a deficiência de fósforo (Magalhães, 1996) como altas concentrações de

alumínio (Bonato et al., 2000) comprometem, especificamente, a síntese *de novo* de proteínas, a qual a induz o sistema de alta capacidade de transporte de nitrato (Behl et al., 1988). O alumínio, por sua vez, interfere principalmente na absorção de nutrientes inibindo, mais especificamente, o crescimento e desenvolvimento das células radiculares (Kochian, 1995), o que reduz o suprimento de energia para o transportador e aumenta a viscosidade do protoplasto nas células das raízes (Fageria & Carvalho, 1982). Portanto, os distúrbios no metabolismo energético celular como consequência da omissão de fósforo e aumento da concentração externa de alumínio justificam o aumento no K_m , que associado à diminuição de I_{max} , indicam menor absorção de nitrato.

Do mesmo modo, a omissão de fósforo provocou uma redução nos valores de I_{max} e aumento de K_m para a *B. brizantha*, sugerindo redução na absorção de amônio (Quadro 4 – contraste C1). Para a *B. humidicola*, somente o aumento nos valores de K_m foram significativos, indicando que a omissão de P ocasionou uma redução da afinidade do sistema de absorção por este íon (Quadro 4 – contraste C1).

A omissão de fósforo reduziu os valores de I_{max} para amônio em 25% nas plantas de *B. brizantha* e 29% nas de *B. humidicola*. Com base nessas variações sugere-se que a absorção de amônio por estas forrageiras seja menos sensível a omissão de fósforo do que a absorção de nitrato, quando estes íons estão presentes em altas concentrações. Glass & Siddiqi (1995) afirmam que maiores taxas de absorção de amônio do que nitrato é uma tendência natural sendo maior a diferença quando os dois íons estão presentes em concentrações equimolares (Macklon et al., 1990).

Os resultados obtidos concordam com os descritos por Schjorring (1986), que constatou ter sido a absorção de amônio menos afetada pela deficiência de fósforo do que a absorção de nitrato em trigo-mouro, cevada e colza. O autor destacou a importância do suprimento de amônio, principalmente quando sob suprimento insuficiente de fósforo.

O estudo do efeito isolado do alumínio sobre a absorção de amônio indicou que, para a *B. humidicola* a exposição das plantas ao Al provocou uma redução nos valores de I_{max} e aumento de K_m (Quadro 4 – contraste C2). Enquanto que para a *B. brizantha* apenas o aumento dos valores de K_m foram significativos, evidenciando redução na afinidade do sistema de absorção por amônio (Quadro 4 – contraste C2).

Segundo Logan et al. (2000), a elevação da concentração de alumínio na solução ocasionou uma maior exudação de H^+ pelas raízes de *B. brizantha* e *B. humidicola*. Segundo esses autores, a maior concentração de H^+ na rizosfera, além de prevenir a absorção de alumínio pelo abaixamento do pH, pode facilitar a absorção de amônio para manutenção da polaridade das membranas celulares. Assim, justifica-se o menor efeito do Al sobre os parâmetros I_{max} e K_m para amônio nas duas forrageiras.

Concordando com os resultados verificados por Magalhães (1996), os valores apresentados no Quadro 4 sugerem que I_{max} para amônio nas duas espécies significativamente maior em relação aos valores obtidos para nitrato quando submetidas à exposição ao alumínio e omissão de fósforo na solução nutritiva. Segundo esse autor, o sistema de transporte de amônio é menos dependente de energia metabólica que o de nitrato. A possibilidade de fluxo passivo de amônio nas condições desse experimento, bem como a concentração utilizada, podem caracterizar uma forma de manutenção da absorção de amônio frente aos fatores causadores de deficiência de energia metabólica, como omissão de fósforo e alta concentração de alumínio na solução nutritiva.

4. CONCLUSÕES

A *Brachiaria humidicola*, de modo geral, apresentou maior absorção do nitrato e amônio, caracterizada por maiores valores de I_{max} com menores valores de K_m e C_{min} , em todos os tratamentos em comparação à *Brachiaria brizantha* cv. Marandu.

Para a *B. brizantha* cv. Marandu a exposição ao Al causou maior redução nos valores de I_{max} e aumento de K_m , quando ele foi a única fonte de N, enquanto que para a *B. humidicola* este efeito foi maior quando o nitrato foi fornecido juntamente com o amônio.

A exposição das plantas a ambientes com baixa disponibilidade de fósforo e elevadas concentrações de Al ocasionou maior redução nos parâmetros cinéticos I_{max} e aumento K_m , que caracterizaram redução na absorção de amônio e nitrato nas duas gramíneas, quando estes estiverem presentes em altas concentrações.

O aumento dos valores de K_m e C_{min} da cinética de nitrato para as duas gramíneas quando submetidas a altas concentrações de Al e, ou, baixa disponibilidade de P, revelaram uma redução na afinidade do sistema pela absorção deste íon e interrupção da absorção mesmo quando este íon estiver presente em altas concentrações, o que poderia ocasionar prováveis perdas de nitrato para o ambiente.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADAMS, J.A. Identification of heterotrophic nitrification in strongly acid larch húmus. *Soil Biol. Biochem.*, 18:339-341, 1986.
- ALVES, V.M.C. Frações de fósforo, de açúcares solúveis e de nitrogênio em quatro híbridos de milho submetidos à omissão e ao ressuprimento de fósforo. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1994. 106p. (Tese de Doutorado)
- ANGHINONI, I.; VOLKART, C.R.; FATTORE, N. & ERNANI, P.R. Morfologia de raízes e cinética da absorção e, diversas espécies e cultivares de plantas. *R. Bras. Ci. Solo*, 13:355-361, 1989.
- BAPTISTA, J.A.; FERNANDES, M.S. & SOUZA, S.R. Cinética de absorção de amônio e crescimento radicular das cultivares de arroz Agulha e Bico de Canga. *Pesq. Agropec. Bras.*, 7:1325-1330, 2000.
- BEHL, R.; TISCHNER, R. & RASCHKE, K. Induction of a high-capacity nitrate-uptake mechanism in barley roots prompted by nitrate uptake through a constitutive low-capacity mechanism. *Planta*, 176:235-240, 1988.
- BONATO, C.M.; CAMBRAIA, J.; SANT'ANNA, R. & ALVAREZ V., V.H. Efeito do alumínio sobre a absorção, partição e a utilização de enxofre em sorgo. *R. Bras. Fisiol. Veg.*, 12:10-16, 2000.
- CALBA, H. & JAILLARD, B. Effect of aluminium on ion uptake and H⁺ release by maize. *New Phytol.*, 137:607-616, 1997.

- CLARK, R. B. Characterization of phosphatase of intact maize roots. J. Agric. Food Chem., 23:458-460, 1975.
- CLAASSEN, N. & BARBER, S.A. A method for characterizing the relation between nutrient concentration and flux into roots of intact plant. Plant Physiol., 54:564-568, 1974.
- COELHO, A.M. Efeito de níveis de N-uréia na dinâmica de amônio e nitrato em Latossolo cultivado e irrigado. In: CONGRESSO NACIONAL DE LA CIENCIA DEL SUELO, Temuco, 1995. Anais. Temuco, 1995. p.7
- DEFILIPO, B.V. & RIBEIRO, A.C. Análise química do solo (metodologia). Viçosa: UFV, 1996. 17p (Boletim de Extensão, 29)
- FAGERIA, N.K. & CARVALHO, J.R.P. Influence of aluminium in nutrient solutions on chemical composition in upland rice cultivars. Plant Soil, 69:31-44, 1982.
- FOY, C.D.; DUKE, J.A. & DEVINE, T.E. Tolerance of soybean germoplasm to an acid tatum subsoil. J. Plant Nutr., 15:527-547, 1992.
- GAHOONIA, T.S.; CLAASSEN, N. & JUNGK, A. Mobilization of phosphate in different soils by ryegrass supplied with ammonium or nitrate. Plant Soil, 140:241-248, 1992.
- GLASS, A.D.M.; SIDDIQI, M.Y. & RUFTY Jr. T.W. Studies of the uptake of nitrate in barley. II: Energetics. Plant Physiol., 93:1585-1589, 1990.
- GLASS, A.D.M. & SIDDIQI, M.Y. Nitrogen absorption by plants roots. In: SRIVASTAVA, H.S., SINGH, R.P. eds. Nitrogen nutrition in higher plants. New Delhi: Associated Publishing Co., 1995, 21-56.
- GRAUER, U.E. & HORST, W.J. Effect of pH and nitrogen source on aluminium tolerance of rye (*Secale cereale*) and yellow lupin (*Lupinus luteus L.*), Plant Soil, 127:13-21, 1990.
- JENSEN, P & KONING, T. Development of regulation mechanisms of SO_4^{2-} influx in spring wheat roots. Physiol. Plantarum, 55:459-464, 1982.
- KEMPERS, A.J. & ZWEERS, A. Ammonium determination in soil extracts by the salicylate method. Comm. Soil Sci. Plant. Anal., 17:715-723, 1986.
- KOCHIAN, L.V. Cellular mechanisms of aluminum toxicity and resistance in plants. Ann. Rev. of Plant Physiol. and Plant Mol. Biol., 46:237-260, 1995.

- LEE, R.B. Selectivity and kinetics of ion uptake by barley plants following nutrient deficiency. *Ann. of Bot.*, 50:429-449, 1982.
- LIRA, M.A.; FARIAS, I.; FERNANDES, A.P.M.; SOARES, L.M. & DUBEUX Jr, J.C.B. Estabilidade de resposta do capim-braquiária (*Brachiaria decumbens*, Stapf.) sob níveis crescentes de nitrogênio e fósforo. *Pesq. Agropec. Bras.*, 29:1151-1157, 1994.
- LOGAN, K.A.B.; THOMAS, R.J. & RAVEN, J.A. Effect of ammonium and phosphorus supply on H⁺ production in gel by two tropical forage grasses. *J. Plant Nutr.*, 23:41-54, 2000.
- MACKLON, A.E.S.; SON, M.M. & SIM, A. Cortical cell fluxes of ammonium and nitrate in excised roots segments of *Allium cepa L.*; studies using ¹⁵N. *J. Exp. Bot.*, 41:359-370, 1990.
- MAGALHÃES, J.V. Absorção e translocação de nitrogênio por plantas de milho (*Zea mays, L.*) submetidas a períodos de omissão de fósforo na solução nutritiva. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1996. 76p. (Tese de Mestrado)
- NOVAIS, R.F. & SMYTH, T.J. Fósforo em solo e planta em condições tropicais. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1999. 399p.
- RAO, I.M.; KERRIDGE, P.C. & MACEDO, M.C.M. Nutritional requirements of Brachiaria and adaptation to acid soils. In: MILES, J.W.; MAASS, B.L. & VALLE, C.B. eds. *Brachiaria: biology, agronomy, and improvement*. Cali: CIAT; Campo Grande: EMBRAPA/CNPGG, 1996. 53-71.
- RUFTY Jr., T.W.; MACKOWN, C.T. & ISRAEL, D.W. Phosphorus stress effects on assimilation of nitrate. *Plant Physiol.*, 94:328-333, 1990.
- RUFTY Jr., T.W.; SIDDIQI, M.Y. & GLASS, A.D.M. Altered ¹³NO₃⁻ influx in phosphorus limited plants. *Plant Sci.*, 76:43-48, 1991.
- RUFTY Jr., T.W.; ISRAEL, D.W. & VOLK, R.J. Phosphate regulation of nitrate assimilation in soybean. *J. Exp. Bot.*, 44:879-891, 1993.
- RUIZ, H.A. & FERNANDES FILHO, E.I. Cinética: software para estimar as constantes V_{máx} e K_m da equação de Michaelis-Menten. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS. Piracicaba. Anais de simpósios. Campinas: Fundação Cargill, 1992. p.124-125. (Série Técnico-Científica)

- RUIZ, H.A.; FERNANDEZ, B.; NOVAIS, R.F.; SANT'ANNA, R. & ALVAREZ V., V.H. Efeito da pressão osmótica da solução nutritiva sobre a absorção de fósforo por plantas de soja. R. Bras. Ci. Solo, 11: 295-297, 1987.
- RUIZ, H.A. Estimativa dos parâmetros cinéticos em K_M e V_{MAX} por uma aproximação gráfico matemática. R. Ceres, 32:79-84, 1985.
- SCHJORRING, J.K. Nitrate and ammonium absorption by plants growing at a sufficient or insufficient level of phosphorus in nutrient solutions. In: LAMBERS, H. ed. Fundamental, ecological and agricultural aspects of nitrogen metabolism in higher plants. Dordrecht: Martinus Nijhoff, 1986. 53-58.
- SIDDIQI, M.Y. GLASS, A.D.M. & RUFTY, T.J. et al. Studies of the regulation of nitrate influx by barley seedlings using $^{13}NO_3^-$. Plant Physiol., 90:806-813, 1989.
- VALE, F.R.; GUAZELLI, E.M.F.; FURTINI NETO, A.E.; & FERNANDES, L.A. Cultivo do feijoeiro em solução nutritiva sob proporções variáveis de amônio e nitrato. R. Bras. Ci. Solo, 22: 35-42, 1998.
- VALE, F.R.; NOVAIS, R.F.; BARROS, N.F. & MILAGRES, B.G. Absorção de nitrato e amônio por raízes intactas de milho pré-tratadas com alumínio. R. Bras. Ci. Solo, 8:215-218, 1984.
- VILELA, L. & ANGHINONI, I. Morfologia do sistema radicular e cinética de absorção de fósforo em cultivares de soja afetados pela interação alumínio-fósforo. R. Bras. Ci. Solo, 8:91-96, 1984.
- YANG, J.E.; SKOGLEY, E.O.; SCHASS, P.E. & KIM, J.J. A simple spectrophotometric determination of nitrate in water, resin and extracts. Soil Sci. Soc. Am. J., 62:108-1115, 1998.

RESUMO DAS CONCLUSÕES

Em solos muito intemperizados, constata-se, normalmente, uma combinação de características como baixo pH, alta atividade de alumínio trocável e disponibilidade limitada de fósforo. Neste contexto, espera-se limitação da atividade de bactérias nitrificadoras, podendo haver predominância de amônio como forma de nitrogênio disponível. Adicionalmente, eventuais problemas de transporte de fósforo para as raízes das culturas, principalmente em ocasiões de queda do teor de água do solo, podem ocasionar problemas quanto à nutrição nitrogenada, estando a absorção do nutriente estreitamente relacionada ao status de fósforo da planta e do solo.

A explicação para este fenômeno está diretamente relacionada com a dependência da absorção de nitrogênio da demanda de energia metabólica pelas plantas. Deste modo, distúrbios nutricionais e agentes externos às plantas, como estresses causados por altas concentrações de alumínio trocável ou déficits hídricos podem alterar a absorção de nitrogênio.

O custo energético parece ser o principal argumento utilizado para explicar a inibição da absorção de nitrogênio em áreas onde as plantas têm sua atividade metabólica afetada com frequência, como em solos tropicais. Nesse contexto, a inibição de um processo metabolicamente dispendioso (absorção de nitrato) em favor de outro mais econômico (absorção de amônio) parece ser uma estratégia bastante apropriada.

Os resultados encontrados nesse trabalho revelaram o efeito depressivo da presença de altas concentrações de alumínio nos parâmetros cinéticos relativos à absorção de nitrato e amônio em gramíneas forrageiras. De acordo com esses parâmetros a *Brachiaria humidicola*, de modo geral, apresentou maior absorção do nitrato e amônio, caracterizada por maiores valores de I_{max} com menores valores de K_m e C_{min} , em todos os tratamentos em comparação a *Brachiaria brizantha* cv. Marandu.

Da mesma forma a exposição das plantas a ambientes com baixa disponibilidade de fósforo e elevadas concentrações de Al ocasionou maior redução nos parâmetros cinéticos I_{max} e aumento K_m , que caracterizaram redução na absorção de amônio e nitrato nas duas gramíneas, quando estes estiverem presentes em altas concentrações.

O aumento dos valores de k_m e C_{min} da cinética de nitrato para as duas gramíneas quando submetidas a altas concentrações de Al e, ou, baixa disponibilidade de P, revelaram uma redução na afinidade do sistema pela absorção deste íon e interrupção da absorção mesmo quando este íon estiver presente em altas concentrações, o que poderia ocasionar prováveis perdas de nitrato para o ambiente.

De acordo com os objetivos dos presentes trabalhos, certifica-se a importância de estudos fisiológicos da absorção de nutrientes e a tentativa de relacioná-los aos estudos de fertilidade, como uma forma de integrar planta e solo, buscando o manejo nutricional adequado a características intrínsecas de plantas e solos.

Quadro 1A – Valores médios de produção de matéria seca e conteúdo de Al, Ca, P e Mg nas raízes (R) e parte aérea (PA) de *B. brizantha* cv. Marandu, *B. humidicola* e Braquiária híbrido cv Mulato de acordo com as concentrações de alumínio na solução nutritiva

Espécie	Concentração de Al	PMS		Al		Ca		P		Mg	
		R	PA	R	PA	R	PA	R	PA	R	PA
		g		mg.planta ⁻¹							
<i>Brachiaria brizantha</i> cv. Marandu											
	0,00	0,177	0,980	0,251	0,105	0,123	7,198	0,121	1,699	0,114	3,580
	0,25	0,167	0,696	1,413	0,550	0,169	2,992	0,242	1,544	0,096	1,991
	0,50	0,163	0,569	1,343	0,497	0,163	2,329	0,217	1,143	0,080	1,592
	1,00	0,117	0,426	0,856	0,612	0,081	1,952	0,106	0,395	0,040	0,919
	1,50	0,113	0,343	0,749	0,915	0,060	1,578	0,086	0,194	0,035	0,516
<i>Brachiaria humidicola</i>											
	0,0	0,062	1,018	0,068	0,000	0,180	7,495	0,120	2,083	0,284	3,938
	0,5	0,060	0,779	2,015	0,605	0,220	3,414	0,147	1,786	0,259	2,251
	1,0	0,061	0,630	1,875	0,792	0,189	2,418	0,136	1,312	0,220	1,819
	1,5	0,040	0,413	1,681	0,660	0,131	1,516	0,091	0,400	0,178	1,065
	2,0	0,032	0,300	1,281	0,920	0,085	1,170	0,059	0,162	0,061	0,403
Braquiária híbrido cv. Mulato											
	0,0	0,200	0,880	0,077	0,092	0,366	5,753	0,166	1,141	0,281	2,824
	0,3	0,150	0,740	0,297	0,165	0,310	2,414	0,111	1,509	0,235	1,804
	0,6	0,133	0,620	0,358	0,308	0,250	2,307	0,103	1,522	0,153	1,229
	0,9	0,143	0,560	0,509	0,257	0,290	1,677	0,112	1,168	0,168	0,922
	1,2	0,127	0,320	0,429	0,344	0,210	1,469	0,078	0,402	0,131	0,552
	1,5	0,117	0,310	0,346	0,314	0,133	1,139	0,068	0,258	0,118	0,413

Quadro 2A - Quadrados médios da análise de variância dos conteúdos de Al, Ca, Mg, P e produção de matéria seca de raiz em plantas de *Brachiaria brizantha* cv. Marandu cultivadas em concentrações crescentes de alumínio na solução nutritiva

FV	GL	QM				
		Al	Ca	Mg	P	PMS
Bloco	2	0,0373	0,00086	0,00074	0,00028 ^{ns}	0,00016 ^{ns}
Conc. de Al	4	0,8600**	0,00941**	0,01941**	0,00713**	0,00980**
Resíduo	8	0,0160	0,00067	0,00046	0,00023	0,00015
CV (%)		13,72	21,82	13,96	20,97	8,31

*, ** e ^{ns} Significativos a 5%, 1% e não significativos, respectivamente, pelo teste F.

Quadro 3A - Quadrados médios da análise de variância dos conteúdos de Al, Ca, Mg, P e produção de matéria seca de parte aérea em plantas de *Brachiaria brizantha* cv. Marandu cultivadas em concentrações crescentes de alumínio na solução nutritiva

FV	GL	QM				
		Al	Ca	Mg	P	PMS
Bloco	2	0,02728 ^{ns}	1,13578	0,03446 ^{ns}	0,15222	0,00948
Conc de Al	4	0,32062**	20,55604**	8,06975**	1,81502**	0,36838**
Resíduo	8	0,04668	0,53422	0,07318	0,12280	0,00164
CV (%)		40,34	22,77	15,73	11,13	6,73

*, ** e ^{ns} Significativos a 5%, 1% e não significativos, respectivamente, pelo teste F.

Quadro 4A - Quadrados médios da análise de variância dos conteúdos de Al, Ca, Mg, P e produção de matéria seca de raiz em plantas de *Brachiaria humidicola* cultivadas em concentrações crescentes de alumínio na solução nutritiva

FV	GL	QM				
		Al	Ca	Mg	P	PMS
Bloco	2	0,06781 ^{ns}	0,00139 ^{ns}	0,00081 ^{ns}	0,00024 ^{ns}	0,00011 ^{ns}
Conc de Al	4	2,40160**	0,00851*	0,44014**	0,00422**	0,00221*
Resíduo	8	0,05022	0,00208	0,00122	0,00016	0,00054
CV (%)		16,19	28,24	16,86	11,69	16,07

*, ** e ^{ns} Significativos a 5%, 1% e não significativos, respectivamente, pelo teste F.

Quadro 5A – Quadrados médios da análise de variância dos conteúdos de Al, Ca, Mg, P e produção de matéria seca de parte aérea em plantas de *Brachiaria humidicola* cultivadas em concentrações crescentes de alumínio na solução nutritiva

FV	GL	QM				
		Al	Ca	Mg	P	PMS
Bloco	2	0,00456 ^{ns}	0,09738 ^{ns}	0,10187	0,01453	0,00210
Conc de Al	4	0,49722**	25,88905**	7,16497**	2,81435**	0,49153**
Resíduo	8	0,03456	0,40419	0,03295	0,00522	0,00086
CV (%)		31,23	19,85	9,57	6,29	5,244

*, ** e ^{ns} Significativos a 5%, 1% e não significativos, respectivamente, pelo teste F.

Quadro 6A - Quadrados médios da análise de variância dos conteúdos de Al, Ca, Mg, P e produção de matéria seca de raiz em plantas de Braquiária híbrido cv Mulato cultivadas em concentrações crescentes de alumínio na solução nutritiva

FV	GL	QM				
		Al	Ca	Mg	P	PMS
Bloco	2	0,00228 ^{ns}	0,00298 ^{ns}	0,00190 ^{ns}	0,00026 ^{ns}	0,00002 ^{ns}
Conc de Al	5	0,15357**	0,08643**	0,05301**	0,00549**	0,00558**
Resíduo	10	0,00166	0,00290	0,00174	0,00029	0,00001
CV (%)		12,13	20,77	23,05	16,21	8,31

*, ** e ^{ns} Significativos a 5%, 1% e não significativos, respectivamente, pelo teste F.

Quadro 7A - Quadrados médios da análise de variância dos conteúdos de Al, Ca, Mg, P e produção de matéria seca de parte aérea em plantas de Braquiária híbrido cv. Mulato cultivadas em concentrações crescentes de alumínio na solução

FV	GL	QM				
		Al	Ca	Mg	P	PMS
Bloco	2	0,00738	0,03070 ^{ns}	0,00801 ^{ns}	0,02761 ^{ns}	0,00169
Conc de Al	5	0,06455**	13,68829**	6,05481**	1,44254**	0,70760**
Resíduo	10	0,00327	0,19132	0,03105	0,19132	0,00134
CV (%)		23,17	17,78	13,65	21,16	5,83

*, ** e ^{ns} Significativos a 5%, 1% e não significativos, respectivamente, pelo teste F.

Quadro 8A - Quadrados médios da análise de variância dos parâmetros de cinética I_{max} e K_m de absorção de nitrato e amônio em plantas de *Brachiaria brizantha* e Marandu submetidas a três períodos (sem Al, com Al por 24 e 72 h) de exposição à solução com alumínio ^{/1}

FV	GL	QM					
		Nitrato		Amônio		Nitrato:Amônio	
		I _{max}	K _m	I _{max}	K _m	I _{max}	K _m
Tratamento	2	27,092*	1135,709**	6,976*	604,656**	7,191*	672,635*
Rel.NO ₃ ⁻ :NH ₄ ⁺	1						
Resíduo	12	7,052	13,093	1,743	0,492	1,810	106,156
CV (%)		40,33	10,46	22,04	1,94	22,78	30,08

*, ** e ^{ns} Significativos a 5%, 1% e não significativos, respectivamente, pelo teste F.

^{/1} 0,7 mmol L⁻¹ de Al

Quadro 9A - Quadrados médios da análise de variância dos parâmetros de cinética I_{max} e K_m de absorção de nitrato e amônio em plantas de *Brachiaria humidicola* submetidas a três períodos (sem Al e com Al por 24 e 72h) de exposição à solução com alumínio ^{/1}

FV	GL	QM					
		Nitrato		Amônio		Nitrato:Amônio	
		I _{max}	K _m	I _{max}	K _m	I _{max}	K _m
Tratamento	2	81,137*	1076,203**	6,906*	405,804**	27,785*	917,961**
Rel.NO ₃ ⁻ :NH ₄ ⁺	1						
Resíduo	12	9,854	22,148	0,936	0,378	7,351	1,338
CV (%)		21,29	12,90	20,01	1,57	21,39	2,95

*, ** e ^{ns} Significativos a 5%, 1% e não significativos, respectivamente, pelo teste F.

^{/1} 1,3 mmol L⁻¹ de Al

Quadro 10A - Quadrados médios da análise de variância dos parâmetros de cinética I_{max} e K_m de absorção de nitrato e amônio em plantas de *Brachiaria brizantha* submetidas a um período omissão de P por quatro dias e expostas à solução com alumínio ^{/1}

FV	GL	QM					
		Nitrato		Amônio		Nitrato:Amônio	
		I _{max}	K _m	I _{max}	K _m	I _{max}	K _m
Trat	3	5,420**	1255,296**	0,791**	580,665*	2,042*	1004,902**
Resíduo	8	0,102	0,640	0,047	111,674	0,473	126,834
CV (%)		7,68	2,00	5,20	31,59	19,93	29,47

*, ** e ^{ns} Significativos a 5%, 1% e não significativos, respectivamente, pelo teste F.

^{/1} 0,7 mmol L⁻¹ de Al

Quadro 11A - Quadrados médios da análise de variância dos parâmetros de cinética I_{max} e K_m de absorção de nitrato e amônio em plantas de *Brachiaria humidicola* submetidas a um período omissão de P por quatro dias e expostas à solução com alumínio ^{/1}

FV	GL	QM					
		Nitrato		Amônio		Nitrato:Amônio	
		I_{max}	K_m	I_{max}	K_m	I_{max}	K_m
Trat	3	81,137**	1076,203**	6,906*	405,804**	29,785*	917,961**
Resíduo	8	9,854	22,148	1,936	0,378	7,041	1,338
CV (%)		21,29	12,90	20,01	1,57	21,39	2,95

*, ** e ^{ns} Significativos a 5%, 1% e não significativos, respectivamente, pelo teste F.

^{/1} 1,3 mmol L⁻¹ de Al

Quadro 12A - Quadrados médios da análise de variância dos conteúdos de alumínio no tecido radicular de *Brachiaria brizantha* e *Brachiaria humidicola* submetidas a três tratamentos (sem Al, com Al por 24 e 72 h) com exposição à solução com alumínio ^{/1}

FV	GL	QM	
		<i>B. brizantha</i>	<i>B. humidicola</i>
Tratamento	2	4,236**	7,218**
Rel. NO ₃ ⁻ :NH ₄ ⁺	1		
Resíduo	12	0,020	0,083
CV (%)		17,55	15,98

*, ** Significativos a 5% e 1%, respectivamente, pelo teste F.

^{/1} 0,7 e 1,3 mmol L⁻¹ de Al para *B. brizantha* e *B. humidicola*, respectivamente.

Quadro 13A - Quadrados médios da análise de variância do conteúdo de alumínio nos tecidos radiculares de *Brachiaria brizantha* e *Brachiaria humidicola* submetidas a um período omissão de P de quatro dias e expostas à solução com alumínio ^{/1}

FV	GL	QM	
		<i>B. brizantha</i>	<i>B. humidicola</i>
Tratamento	3	0,2423**	0,1507**
Resíduo	8	0,0049	0,0067
CV (%)		14,51	14,13

*, ** Significativos a 5% e 1%, respectivamente, pelo teste F.

^{/1} 0,7 e 1,3 mmol L⁻¹ de Al para *B. brizantha* e *B. humidicola*, respectivamente.

Quadro 14A - Quadrados médios da análise de variância do conteúdo de fósforo em plantas de *Brachiaria brizantha* submetidas a um período omissão de P de quatro dias e expostas à solução com alumínio ¹

FV	GL	QM			
		<i>B. brizantha</i>		<i>B. humidicola</i>	
		Raiz	P. aérea	Raiz	P. aérea
Trat	3	0,0081**	0,7527**	0,7092**	0,8606**
Res.	8	0,0004	0,0565	0,0133	0,0313
CV (%)		10,36	13,53	12,44	11,49

*, ** Significativos a 5% e 1%, respectivamente, pelo teste F.

¹ 0,7 e 1,3 mmol L⁻¹ de Al para *B. brizantha* e *B. humidicola*, respectivamente.