

Interação da deficiência hídrica e da toxicidade do alumínio em guandu cultivado em hidroponia

Adão Marin⁽¹⁾ e Durvalina Maria Mathias dos Santos⁽¹⁾

⁽¹⁾Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Departamento de Biologia Aplicada à Agropecuária, Via de acesso Prof. Paulo Donato Castellane, Km 5, CEP 14884-900 Jaboticabal, SP. E-mail: adaomarin@yahoo.com, dumaria@fcav.unesp.br

Resumo – O objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito da interação da deficiência hídrica e da toxicidade do alumínio no crescimento inicial e teores de prolina livre em duas cultivares de guandu, IAPAR 43-Aratã e IAC Fava Larga, cultivadas em hidroponia. As plântulas foram submetidas aos estresses em solução nutritiva (pH 3,8), nos potenciais osmóticos de 0, -0,004, -0,006, -0,008 e -0,010 MPa, com 0, 0,25, 0,50, 0,75 e 1 mmol dm⁻³ de Al³⁺. O experimento foi conduzido em sala de crescimento, sob luminária com irradiância média de 190 μmol m⁻² s⁻¹, fotoperíodo de 12 horas e temperatura de 25±1°C. O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, em arranjo fatorial 2x5x5 (duas cultivares de guandu, cinco potenciais osmóticos e cinco níveis de alumínio), com quatro repetições. Os dados foram submetidos às análises de regressão polinomial, agrupamento e componentes principais. A deficiência hídrica causa redução do crescimento da parte aérea do guandu, e a toxicidade do alumínio provoca diminuição do crescimento radicular. Houve aumento nos teores de prolina livre nas duas cultivares sob deficiência hídrica, e apenas na IAC Fava Larga sob toxicidade de alumínio. Na análise multivariada, foi observada alta correlação no crescimento e no acúmulo de prolina na cultivar IAC Fava Larga, o que evidencia provável tolerância aos estresses associados.

Termos para indexação: *Cajanus cajan*, estresse abiótico, forrageira, osmoprotetor, prolina.

Interaction of water stress and aluminum toxicity in pigeon pea cultivated in hydroponics

Abstract – The objective of this work was to evaluate the interaction effect of water stress and aluminum toxicity on the initial growth and free proline contents in two cultivars of pigeon pea, IAPAR 43-Aratã and IAC Fava Larga, cultivated in hydroponics. The seedlings were submitted to stresses in nutritive solution (pH 3.8), osmotic potentials 0, -0.004, -0.006, -0.008 and -0.010 MPa, with 0, 0.25, 0.50, 0.75 and 1 mmol dm⁻³ Al³⁺. The experiment was carried out in a plant growth room, under a luminary unit of average irradiance 190 μmol m⁻² s⁻¹, 12-hour photoperiod and 25±1°C temperature. A completely randomized experimental design was used in factorial arrangement 2x5x5 (two pigeon pea cultivars, five osmotic potential and five levels), with four replicates. Data were submitted to analyses of polynomial regression, cluster and main components. Water stress causes growth reduction of pigeon pea aerial part, whereas aluminum toxicity causes radicular growth reduction. There was increase of free proline contents in the two cultivars under water stress, and only in IAC Fava Larga under aluminum toxicity. Multivariate analysis showed high correlation in growth and accumulation of proline for cultivar IAC Fava Larga, evidencing probable tolerance to associated stresses.

Index terms: *Cajanus cajan*, abiotic stress, forage crop, osmoprotector, proline.

Introdução

A deficiência hídrica é considerada o mais importante fator ambiental, porque a produtividade das plantas depende da quantidade disponível de água e da eficiência do seu uso pelo vegetal (Taiz & Zeiger, 2004). Esse estresse constitui um dos mais sérios problemas mundiais, pois causa redução severa na produtividade e na qualidade dos produtos agrícolas

(Hongbo et al., 2006), e supera os efeitos de outros estresses ambientais (Abdul Jaleel et al., 2007). Atualmente, um dos maiores desafios da agricultura está na manutenção da produtividade sob deficiência hídrica, o que torna necessária a compreensão dos mecanismos de adaptação das plantas à seca (Lizana et al., 2006; Abdul Jaleel et al., 2007).

A toxicidade do alumínio é considerada um dos principais fatores limitantes do crescimento vegetal,

em solos ácidos presentes nas regiões tropicais, principalmente por causar inibição do crescimento radicular (Giannakoula et al., 2008). O alumínio em níveis tóxicos está presente em 50% das áreas com potencial agrícola, além disso, a acidez nos solos tem se agravado com o extensivo uso de fertilizantes amoniacais (Zhang et al., 2007). No Brasil, a expansão do plantio direto nas áreas formadas por latossolos e argissolos, nos quais a aplicação do calcário para correção da acidez é realizada superficialmente, aumenta a importância de cultivares tolerantes à toxicidade do alumínio, em razão do maior tempo de resposta para adequação do pH e conseqüente diminuição da toxicidade do alumínio (Caires et al., 2008).

A primeira resposta fisiológica das plantas aos estresses ambientais é o ajustamento osmótico que contribui para a tolerância ao estresse. O mecanismo de ajustamento osmótico é importante para evitar a diminuição do potencial hídrico celular, mediante a biossíntese de solutos compatíveis intracelulares, os quais têm baixo peso molecular, se acumulam em altas quantidades no vacúolo ou no citosol, e mantêm a turgidez e o volume celular para preservar a integridade de compostos e estruturas celulares, fundamentais para o adequado metabolismo vegetal (Abdul Jaleel et al., 2007). O aminoácido prolina está presente em pequenas quantidades nas plantas, em que aproximadamente 1 a 5 $\mu\text{mol g}^{-1}$ de matéria seca é considerado osmólito-chave para o ajustamento osmótico sob deficiência hídrica e toxicidade de alumínio. A prolina acumula-se nas células com função osmoprotetora (Marin, 2003; Giannakoula et al., 2008), o que previne a desnaturação de proteínas, preserva a estrutura de enzimas, protege as membranas dos efeitos deletérios causados pelas espécies reativas de oxigênio (reactive oxygen species – ROS) (Sharma & Dubey, 2005) e age como tampão para regular o potencial redox celular (Ashraf & Foolad, 2007). O acúmulo de prolina é considerado importante parâmetro de seleção de plantas tolerantes aos estresses (Manivannan et al., 2007).

Estudos têm revelado que as respostas das plantas sob um único estresse não podem ser diretamente inferidas dos efeitos de distintos estresses que ocorrem conjuntamente, pois a associação de estresses provoca respostas singulares para a adaptação da planta e, assim, é necessário que os futuros programas de pesquisa enfatizem as respostas das plantas aos efeitos associados de estresses ambientais, o que se aproxima

mais da realidade dos ambientes agrícolas (Mittler, 2006).

O guandu (*Cajanus cajan* (L.) Millsp.), leguminosa tropical adaptada às diferentes condições ambientais, é amplamente difundido no Brasil e é utilizado como adubo-verde, em razão do elevado conteúdo de nutrientes e alta capacidade de fixação simbiótica de nitrogênio (272 kg ha⁻¹ de N), além de ser muito empregado na alimentação de ruminantes como forrageira. O guandu apresenta produtividade média de 60 Mg ha⁻¹ de matéria verde e 15 Mg ha⁻¹ de matéria seca, com teores médios de 17% de proteína bruta. (Morel & Piccolo, 2006).

O objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito da interação da deficiência hídrica e da toxicidade do alumínio no crescimento inicial e teores de prolina livre, em duas cultivares de guandu, IAPAR 43-Aratã e IAC Fava Larga, cultivadas em hidroponia.

Material e Métodos

O experimento foi realizado de janeiro de 2005 a agosto de 2006, no Laboratório de Fisiologia Vegetal, do Departamento de Biologia Aplicada à Agropecuária, da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal.

Para obtenção das plântulas, foram utilizadas quatro bandejas de plástico com areia lavada, nas quais foram semeadas as cultivares IAPAR 43-Aratã e IAC Fava Larga. As bandejas foram mantidas no lado externo do laboratório, em temperatura e luminosidade ambiente. Foram realizadas regas diárias, para evitar a deficiência hídrica durante a germinação. As plântulas foram transferidas 10 dias após a semeadura (DAS), para a solução nutritiva (Clark, 1977): 2,53 mM de Ca(NO₃)₂.4H₂O, 1,30 mM de KNO₃, 0,60 mM de MgSO₄.7H₂O, 0,90 mM de NH₄NO₃, 0,50 mM de KCl, 0,0345 mM de Ca(H₂PO₄)₂.H₂O, 0,007 mM de MnCl₂.4H₂O, 0,019 mM de H₃BO₄, 0,002 mM de ZnSO₄.7H₂O, 0,0006 mM de H₂MoO₄.H₂O, 0,0005 mM de CuSO₄.5H₂O e 0,038 mM de Fe EDTA. Para a disponibilização do Al³⁺, o pH foi ajustado em 3,8, recomendado para esta solução nutritiva (Clark, 1977). Foram utilizados frascos de vidro, tipo “snap cap” transparentes, com capacidade de 190 mL, revestidos com papel alumínio para evitar a formação de algas.

O experimento foi conduzido em sala de crescimento, sob luminária com irradiância média de

190 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, fotoperíodo controlado de 12 horas, em temperatura média de $25 \pm 1^\circ\text{C}$ e umidade relativa média de 40%. Realizou-se a aclimação das plântulas à solução nutritiva por 10 dias, tendo-se utilizado solução nutritiva ½ força, por cinco dias, e força total por mais cinco dias. Após este período, as plântulas com a idade de 20 dias foram submetidas aos níveis de deficiência hídrica, induzidos por PEG 6000 nos potenciais osmóticos ($\Psi\pi$) 0, -0,004, -0,006, -0,008 e -0,010 MPa, e à toxicidade de alumínio (Narayanan & Syamala, 1989) com o sulfato de alumínio $[\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}]$ nos níveis 0, 0,25, 0,50, 0,75 e 1 mmol dm^{-3} de Al^{3+} .

As soluções foram trocadas a cada três dias, em virtude de possíveis alterações da composição química, dos potenciais osmóticos e das concentrações de alumínio e, também, para promover a aeração da solução. Este procedimento foi mantido até o final do experimento (30 DAS), quando as avaliações fisiológicas foram realizadas nas plantas submetidas a 10 dias de estresse. As plântulas de guandu foram cortadas na altura do colo, e foi realizada a avaliação da altura, massa de matéria fresca de folhas, massa de matéria seca de caules e área foliar, determinada por meio do sistema de análise de imagens Delta-T. Do sistema radicular, foi avaliada a densidade de raízes (mm cm^{-3} de solução nutritiva) de acordo com o método de Tennant (1975).

Os teores de prolina livre nas folhas foram determinados pelo método de Bates et al. (1973) e calculados com base na massa de matéria fresca de folhas, pela fórmula: $[(\mu\text{g prolina mL}^{-1} \times \text{mL tolueno}) / 115,5 \mu\text{g } \mu\text{mol}^{-1}] / [(g amostra) / 5] = \mu\text{mol g}^{-1}$ de massa de matéria fresca (MF).

O delineamento experimental foi o inteiramente casualizado, em arranjo fatorial $2 \times 5 \times 5$: duas cultivares de guandu (C), cinco potenciais osmóticos (P) e cinco

concentrações de alumínio (A), com quatro repetições. Os dados foram submetidos à análise de variância e, quando significativos pelo teste F, foi realizada a análise da regressão polinomial (Banzatto & Kronka, 2006). Somente para prolina, foi realizada a transformação dos dados em $\ln(x + 1)$ para a homogeneização das variâncias dos dados. O estudo da significância das interações triplas foi realizado por meio das análises multivariadas de agrupamento e de componentes principais, que permitiram a avaliação em conjunto dos estresses nas cultivares de guandu (Manly, 1994). A análise de agrupamento engloba uma variedade de técnicas e algoritmos, cujo objetivo é encontrar e separar objetos em grupos similares. Também, para se verificar a medida de similaridade entre os tratamentos, foi adotada a distância euclidiana e, para a estratégia de agrupamento, utilizou-se o método não ponderado de agrupamento aos pares com médias aritméticas (UPGMA - unweighted pair group method with arithmetic mean).

Resultados e Discussão

O crescimento de caules da 'IAC Fava Larga' foi acentuadamente reduzido com o aumento da deficiência hídrica (Tabela 1). Omami (2005) observou em caruru-roxo (Amaranthaceae), sob estresse hídrico de -0,4 MPa, em solução nutritiva durante oito dias, a redução de 45% na massa da matéria seca de caules (Omami, 2005).

Em ambas as cultivares, houve acúmulo de prolina livre nas folhas, com a diminuição dos potenciais osmóticos (Tabela 1); verificou-se que em comparação ao tratamento 0 MPa, as cultivares de guandu apresentaram aumento significativo de prolina com 368,1% na IAPAR 43-Aratã e 451,3% na IAC Fava Larga, no potencial osmótico de 0,010 MPa

Tabela 1. Matéria seca de caules e teores de prolina livre, sob efeito da deficiência hídrica, e matéria fresca de folhas e teores de prolina livre, sob efeito do alumínio, de plântulas das cultivares de guandu IAPAR 43-Aratã e IAC Fava Larga.

Cultivares	Potencial osmótico (MPa)					Concentração de alumínio (mmol dm^{-3})				
	0,000	-0,004	-0,006	-0,008	-0,010	0,00	0,25	0,50	0,75	1,00
	-----Matéria seca de caules (mg)-----					-----Matéria fresca de folhas (mg)-----				
IAPAR 43-Aratã	23,3a	25,9a	23,7a	23,5a	22,0a	273,7a	229,1a	234,8a	221,3a	212,0a
IAC Fava Larga	38,6ab	40,6a	34,5b	34,0b	28,1c	498,6a	382,1b	381,1b	396,6b	262,4c
	-----Teores de prolina livre ⁽²⁾ ($\mu\text{mol g}^{-1}$ MF)-----					-----Teores de prolina livre ⁽²⁾ ($\mu\text{mol g}^{-1}$ MF)-----				
IAPAR 43-Aratã	0,91d	2,85c	3,22bc	3,56b	4,25a	2,67a	2,92a	3,07a	3,15a	2,97a
IAC Fava Larga	0,79c	3,51b	3,75b	3,64b	4,38a	2,57c	3,12bc	3,01bc	3,22b	4,15a

⁽¹⁾Médias seguidas de letras iguais, nas linhas, dentro de cada variável, não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade. ⁽²⁾Dados de teores e prolina livre transformados em $\ln(x + 1)$.

(Tabela 1). Como osmólito compatível, a prolina acumula-se principalmente no citoplasma e atua como osmoprotetor, o que restringe a desidratação do citosol sob redução do potencial hídrico extracelular (Kavi Kishor et al., 2005). Em condições de estresse hídrico de -0,6 a -1,1 MPa, após 14 dias, houve aumento de 56% nos teores de prolina livre, nas folhas de feijão-mungo (Hamidou et al., 2007).

Na 'IAC Fava Larga', houve acentuada redução da massa de matéria fresca das folhas e aumento nos teores de prolina (Tabela 1). Em cultivares de ervilha, trigo, milho e cevada, em condições de toxicidade de alumínio, o acúmulo significativo de prolina indicou que a síntese deste aminoácido está inteiramente relacionada aos teores de alumínio presentes nas plantas (Zaifnejad et al., 1997). No presente trabalho, o acúmulo de prolina causou efeito de osmoproteção, o que auxiliou na manutenção hídrica das células foliares da 'IAC Fava Larga', pois ocorreu um efluxo de água (diminuição do potencial hídrico celular, Ψ_{celular}), considerando-se os resultados obtidos quanto à massa de matéria fresca (Tabela 1). O alumínio, neste caso, pode ter atuado como soluto (π) e causado diminuição do potencial osmótico, o que promoveu a saída de água da célula e, provavelmente, pelas rotas de sinalização,

houve o início de uma cascata de eventos moleculares que induziu o acúmulo de prolina como soluto compatível (Bray et al., 2000; Mossor-Pietraszewska, 2001) nas folhas da 'IAC Fava Larga'. Esse acúmulo está associado não somente às plantas sob condições de estresse hídrico, mas também àquelas sob condições de estresse ácido causado pela toxicidade de alumínio (Marin, 2003; Marin et al., 2006).

A interação da deficiência hídrica e da toxicidade de alumínio ocorreu na massa de matéria fresca das folhas, na área foliar, na massa de matéria seca dos caules, na densidade de raízes e nos teores de prolina livre nas folhas (Figuras 1 a 5). O efeito simultâneo de ambos os estresses evidenciou que houve acentuada diminuição da massa de matéria fresca das folhas (Figura 1) e da área foliar (Figura 2), ocasionada, principalmente, pela diminuição do potencial osmótico e pelo aumento da deficiência hídrica (Figuras 1 e 2). O alumínio causou toxicidade apenas em -0,006 MPa, em ambos os parâmetros avaliados (Figuras 1 e 2). Na literatura, geralmente, encontram-se informações sobre os efeitos isolados da deficiência hídrica ou da toxicidade do alumínio (Marin, 2003). O efeito sinérgico foi observado em plântulas de sorgo (Zaifnejad et al., 1997) e de guandu (Marin, 2003), o que evidenciou

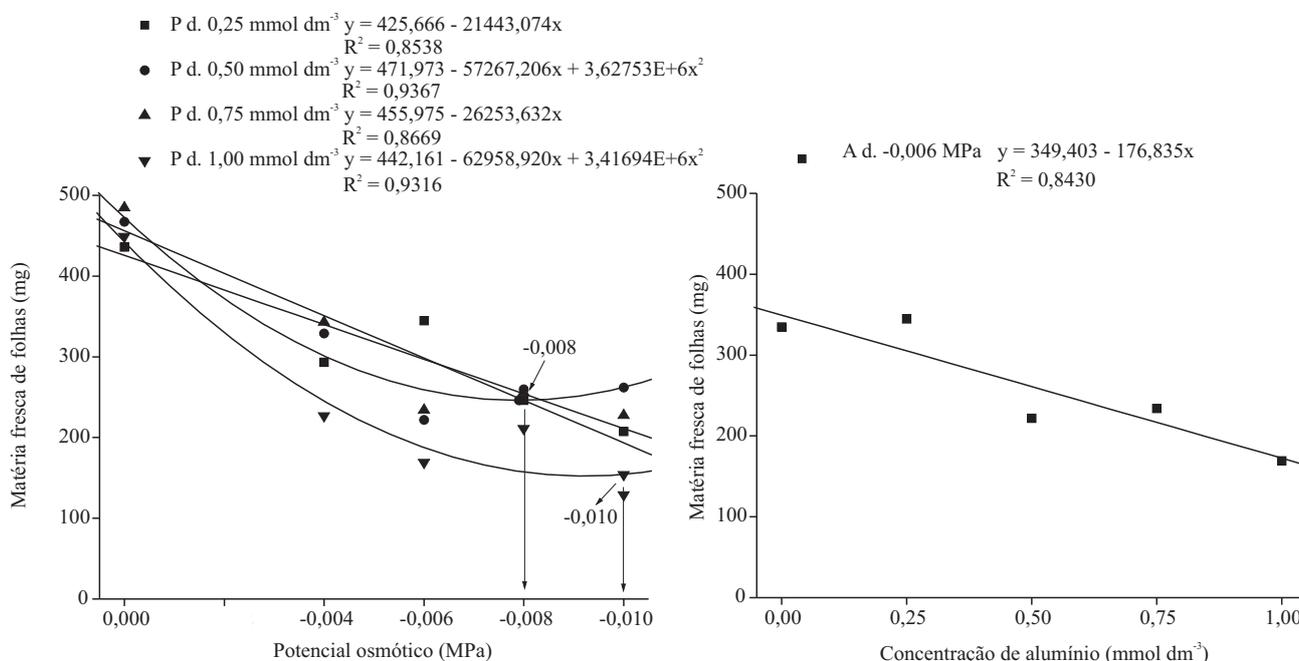


Figura 1. Matéria fresca de folhas (mg) de plântulas das cultivares de guandu IAPAR 43-Aratã e IAC Fava Larga, sob interação da deficiência hídrica e de toxicidade do alumínio.

diminuição acentuada no crescimento da parte aérea, em comparação com plantas sob os estresses isolados e que são corroborados pelos resultados do presente trabalho.

Quanto à massa de matéria seca dos caules (Figura 3), ocorreu efeito sinérgico de ambos estresses, o que revela a redução deste parâmetro, conforme o aumento da deficiência hídrica na solução nutritiva, apenas no

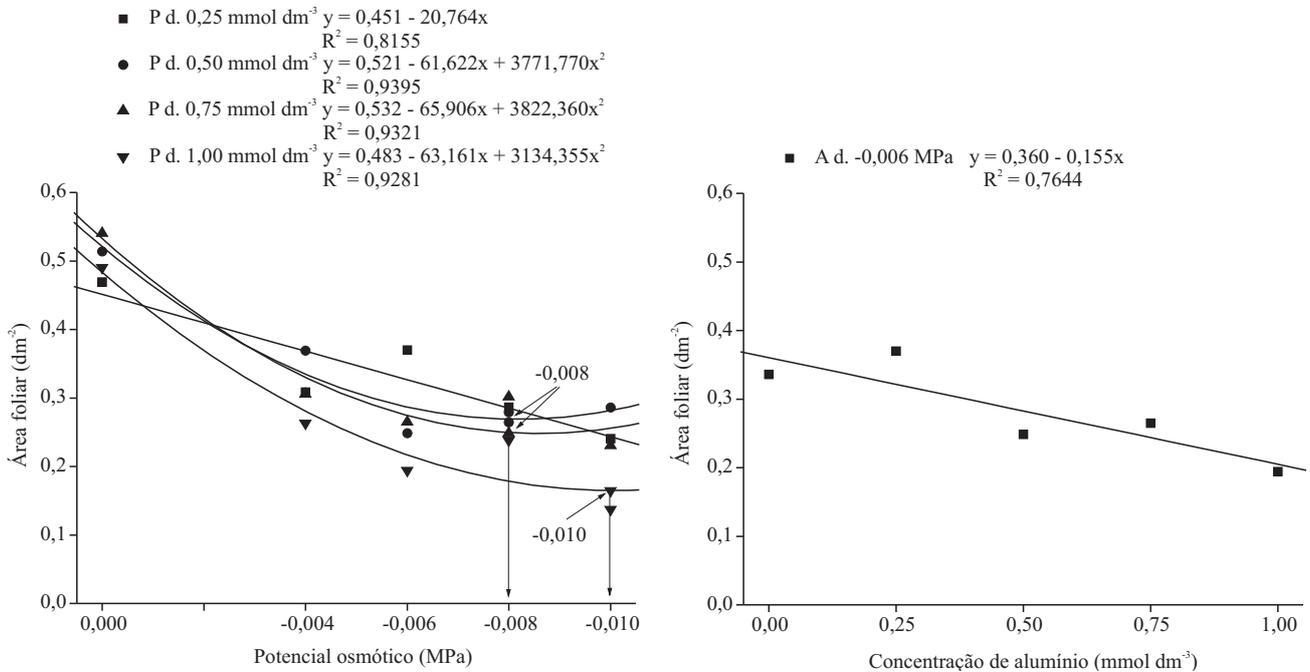


Figura 2. Área foliar (dm²) de plântulas das cultivares de guandu IAPAR 43-Aratã e IAC Fava Larga, sob interação da deficiência hídrica e de toxicidade do alumínio.

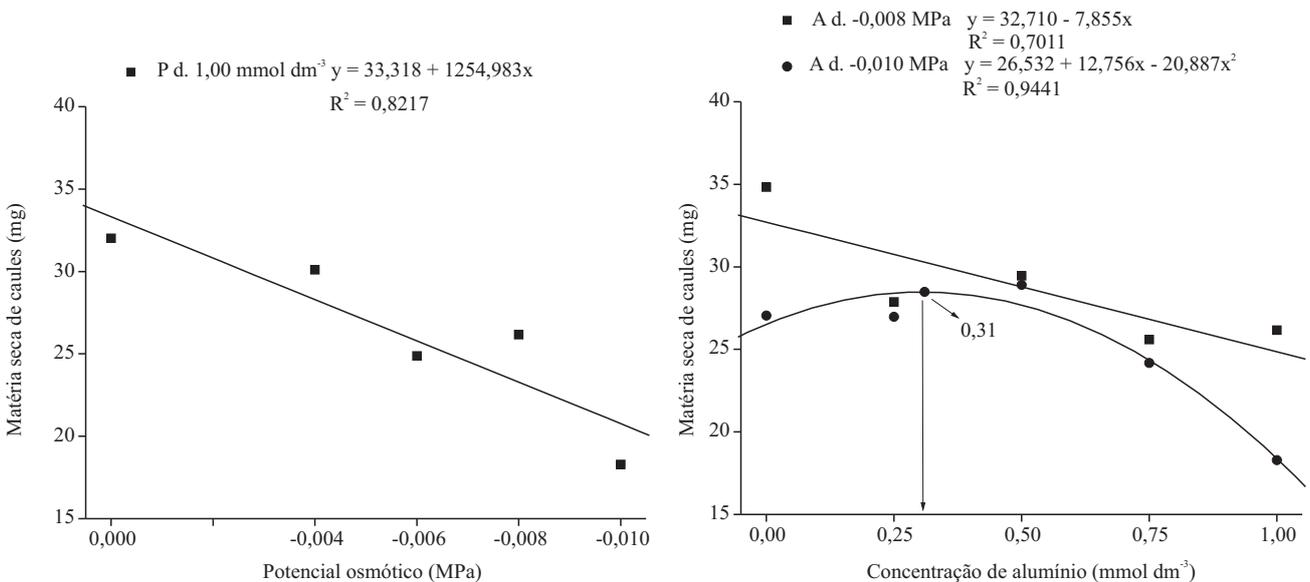


Figura 3. Matéria seca de caules (mg) de plântulas das cultivares de guandu IAPAR 43-Aratã e IAC Fava Larga, sob interação da deficiência hídrica e de toxicidade do alumínio.

nível de 1 mmol dm^{-3} de Al^{3+} (Figura 3) e, também, nas concentrações de alumínio nos potenciais osmóticos de $-0,008 \text{ MPa}$ e $-0,01 \text{ MPa}$. De fato, os efeitos do

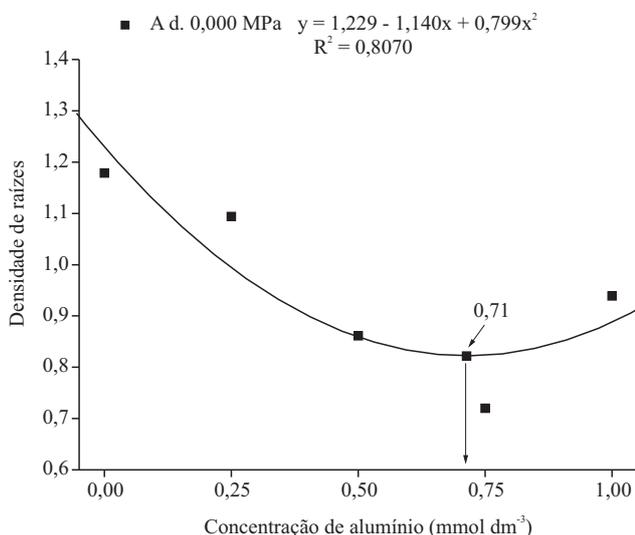


Figura 4. Densidade de raízes (mm cm^{-3} solução nutritiva) de plântulas das cultivares de guandu IAPAR 43-Aratã e IAC Fava Larga, sob toxicidade do alumínio.

alumínio na parte aérea manifestam-se pela diminuição no transporte de cálcio e ferro, o que induz à deficiência desses minerais e causa a redução da massa de matéria seca e, conseqüentemente, ao menor crescimento (Rout, 2001).

Os resultados do presente trabalho mostram que apenas o alumínio causou efeito nas raízes de ambas as cultivares de guandu. Houve significativa redução da densidade de raízes, que apresentaram valor mínimo em $0,71 \text{ mmol dm}^{-3}$ de Al^{3+} (Figura 4). Os efeitos do alumínio nas raízes são bem documentados na literatura, e a redução da taxa de crescimento radicular de plantas sensíveis tem sido considerada o principal efeito de níveis tóxicos de alumínio que influi no alongamento e na divisão celular (Ferreira et al., 2006). O sintoma inicial da toxicidade provocada pelo alumínio é a inibição do crescimento das raízes, causado pela inibição do alongamento celular, em razão dos danos que ocorrem inicialmente no ápice radicular (Samac & Tesfaye, 2003). Em solo com 2 mmol dm^{-3} de alumínio também houve significativa redução da densidade de raízes de guandu 'IAPAR 43-Aratã' (Marin, 2003). O dano na formação da estrutura das raízes – engrossamento e diminuição da permeabilidade das células radiculares –

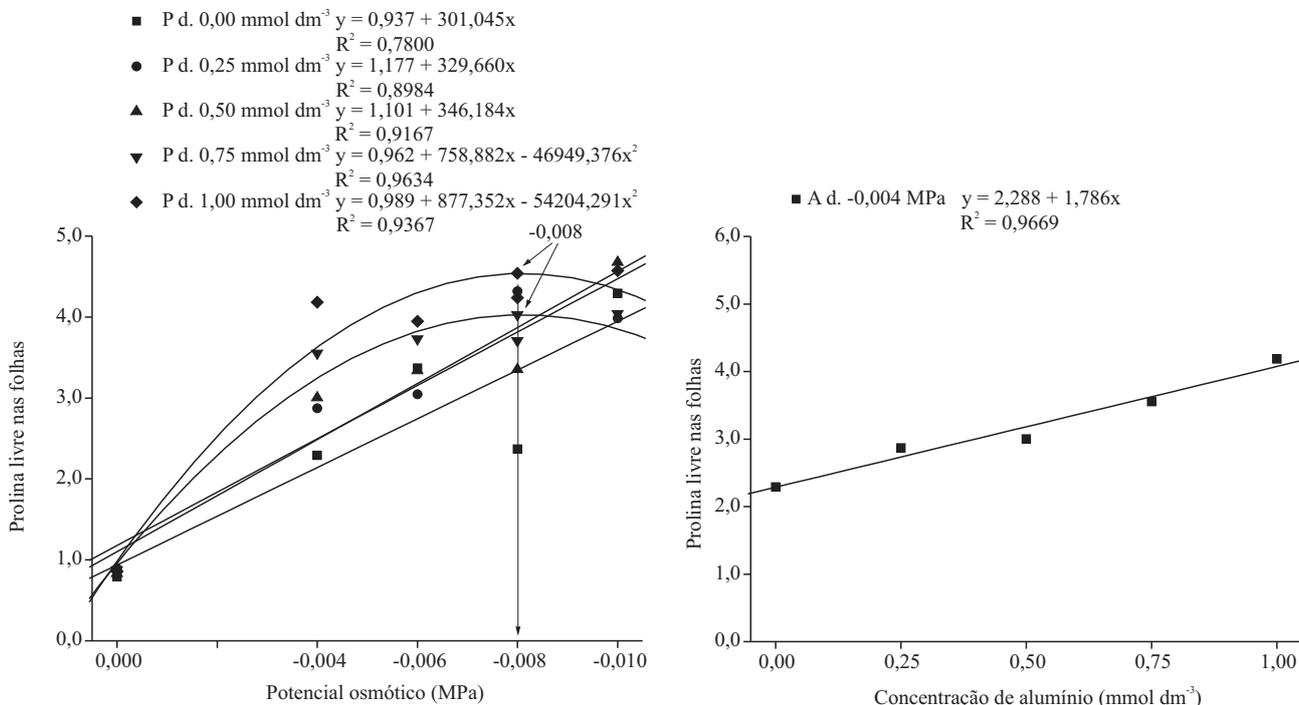


Figura 5. Teores de prolina livre ($\mu\text{mol g}^{-1}$ MF) nas folhas de plântulas das cultivares de guandu IAPAR 43-Aratã e IAC Fava Larga, sob interação da deficiência hídrica e de toxicidade do alumínio. Para análise, os dados foram transformados em $\ln(x + 1)$.

contribuiu para acentuar os efeitos deletérios do alumínio no sistema radicular (Barceló & Poschenrieder, 2002; Illés et al., 2006).

A interação de ambos os estresses provocou acúmulo de prolina livre nas folhas das cultivares de guandu (Figura 5). O aumento nos teores deste aminoácido ocorreu, sobretudo, em razão da diminuição do potencial osmótico em todos os níveis de alumínio, que atingiram valores máximos em $-0,008$ MPa a $0,75$ mmol dm^{-3} de Al^{3+} ($4,03$ $\mu\text{mol g}^{-1}$ MF) e 1 mmol dm^{-3} de Al^{3+} ($4,54$ $\mu\text{mol g}^{-1}$ MF). Os efeitos do alumínio no acúmulo de prolina foram evidentes apenas em $-0,004$ MPa, o que indica que houve aumento nos teores deste aminoácido com o aumento das concentrações de alumínio, em condições de maior disponibilidade hídrica. Em solo, o efeito associado do estresse hídrico e do alumínio promoveu também o acúmulo de prolina na parte aérea de guandu (Marin et al., 2006), corroborado pelos resultados do presente trabalho. Em outra leguminosa forrageira, o feijão-mungo, verificou-se que a elevada concentração de alumínio (10 mM) reduziu o conteúdo relativo de água nas folhas e, conseqüentemente, houve acúmulo de prolina, o que foi atribuído à diminuição da absorção de água pelos efeitos deletérios causados pelo alumínio no sistema radicular (Ali et al., 2008).

Para o conjunto das avaliações fisiológicas massa de matéria fresca das folhas, massa de matéria seca dos caules, área foliar e teores de prolina livre nas folhas, em relação a todas as médias das combinações de tratamentos utilizados, a análise de componentes principais possibilitou a construção do gráfico bidimensional (Figura 6). Os dois primeiros eixos,

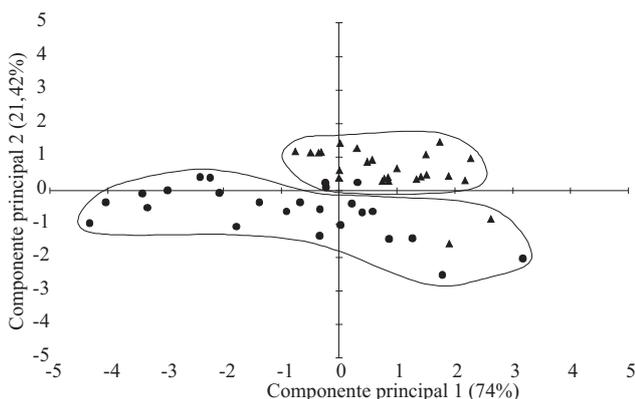


Figura 6. Distribuição das cultivares IAPAR 43-Aratã (▲) e IAC Fava Larga (●), nos componentes principais 1 e 2, sob interação da deficiência hídrica e de toxicidade do alumínio.

componente principal 1 na posição horizontal (CP1) e componente principal 2 na posição vertical (CP2), são os que retêm maior quantidade de informação do conjunto original das avaliações fisiológicas, tendo neste estudo acumulado 95,42%, isto é 74% no CP1 e 21,42% no CP2 (Tabela 2). Assim, considerando-se a alta correlação negativa das avaliações de massa de matéria fresca das folhas ($-0,99$), massa de matéria seca dos caules ($-0,83$) e área foliar ($-0,98$), com o eixo CP1, e dos teores de prolina livre nas folhas ($-0,79$) com o eixo CP2 (Tabela 2), verificou-se que a cultivar IAC Fava Larga – predominantemente localizada nas posições negativas (esquerda) no eixo CP1 – tende a apresentar valores maiores de massa de matéria fresca das folhas, massa de matéria seca dos caules e de área foliar, em comparação à IAPAR 43-Aratã, localizada nas posições positivas (direita) do eixo (Figura 6). Com relação ao eixo CP2, observa-se que o maior acúmulo de prolina nas folhas está correlacionado à cultivar IAC Fava Larga, predominantemente localizada, nas posições negativas (abaixo) no eixo, em comparação à IAPAR 43-Aratã, localizada nas posições positivas (acima) no eixo CP2. O maior crescimento e acúmulo de prolina sob deficiência hídrica e toxicidade de alumínio têm alta correlação com a cultivar IAC Fava Larga, o que demonstra, provavelmente, maior tolerância aos estresses nas condições experimentais do presente trabalho. De fato, no estudo dos efeitos da disponibilidade hídrica e da acidez do solo sobre o crescimento inicial e sobre os teores de prolina nas cultivares de guandu IAPAR 43-Aratã e IAC Fava Larga (Marin, 2003), a análise de componentes principais possibilitou inferir maior desenvolvimento da IAC Fava Larga, inclusive sob restrição hídrica severa (20%), porque houve maior acúmulo de prolina livre.

Tabela 2. Coeficientes de correlação entre os componentes principais (CP1 e CP2) e as características fisiológicas, de plântulas das cultivares de guandu IAPAR 43-Aratã e IAC Fava Larga, sob interação da deficiência hídrica e de toxicidade do alumínio.

Variáveis	Componentes principais	
	CP1	CP2
Matéria fresca de folhas (mg)	-0,99	-0,03
Matéria seca de caules (mg)	-0,83	-0,48
Área foliar (dm^2)	-0,98	-0,04
Prolina livre nas folhas ($\mu\text{mol g}^{-1}$ MF)	0,59	-0,79

Conclusões

1. A deficiência hídrica reduz o crescimento da parte aérea das plantas de guandu, e a toxicidade do alumínio reduz o crescimento das raízes.

2. Os teores de prolina aumentam sob deficiência hídrica, em ambas as cultivares de guandu, e sob toxicidade do alumínio, há aumento deste aminoácido apenas na cultivar IAC Fava Larga.

3. A interação dos estresses indica alta correlação no crescimento e no acúmulo de prolina, em plântulas da cultivar IAC Fava Larga, o que evidencia tolerância aos estresses associados.

Agradecimentos

Ao Prof. David Arioaldo Banzatto, pelas orientações na análise estatística dos dados.

Referências

- ABDUL JALEEL, C.; MANIVANNAN, P.; KISHOREKUMAR, A.; SANKAR, B.; GOPI, R.; SOMASUNDARAM, R.; PANEERSELVAM, R. Alterations in osmoregulation, antioxidant enzymes and indole alkaloid levels in *Catharanthus roseus* exposed to water deficit. **Colloids and Surfaces B: Biointerfaces**, v.59, p.150-157, 2007.
- ALI, B.; HASAN, S.A.; HAYAT, S.; HAYAT, Q.; YADAV, S.; FARIDUDDIN, Q.; AHMAD, A. A role for brassinosteroids in the amelioration of aluminium stress through antioxidant system in mung bean (*Vigna radiata* L. Wilczek). **Environmental and Experimental Botany**, v.62, p.153-159, 2008.
- ASHRAF, M.; FOOLAD, M.R. Roles of glycine betaine and proline in improving plant abiotic stress resistance. **Environmental and Experimental Botany**, v.59, p.206-216, 2007.
- BANZATTO, D.A.; KRONKA, S. do N. **Experimentação agrícola**. 4.ed. Jaboticabal: Funep, 2006. 237p.
- BARCELÓ, J.; POSCHENRIEDER, C. Fast root growth responses, root exudates and internal detoxification as clues to the mechanisms of aluminium toxicity and resistance: a review. **Environmental and Experimental Botany**, v.48, p.75-92, 2002.
- BATES, L.S.; WALDREN, R.P.; TEARE, I.D. Rapid determination of free proline for water-stress studies. **Plant and Soil**, v.39, p.205-207, 1973.
- BRAY, E.A.; BAILEY-SERRES, J.; WERETILNYK, E. Responses to abiotic stresses. In: BUCHANAN, B.B.; GRUISSEM, W.; JONES, R.L. (Ed.). **Biochemistry and molecular biology of plants**. Rockville: American Society of Plant Physiologists, 2000. p.1158-1249.
- CAIRES, E.F.; GARBUIO, F.J.; CHURKA, S.; BARTH, G.; CORRÊA, J.C.L. Effects of soil acidity amelioration by surface liming on no-till corn, soybean, and wheat root growth and yield. **European Journal of Agronomy**, v.28, p.57-64, 2008.
- CLARK, R.B. Effect of aluminum on growth and mineral elements of Al-tolerant and Al-intolerant corn. **Plant and Soil**, v.47, p.653-662, 1977.
- FERREIRA, R. de P.; MOREIRA, A.; RASSINI, J.B. **Toxidez de alumínio em culturas anuais**. São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2006. 35p. (Embrapa Pecuária Sudeste. Documentos, 63).
- GIANNAKOULA, A.; MOUSTAKAS, M.; MYLONA, P.; PAPADAKIS, I.; YUPSANIS, T. Aluminum tolerance in maize is correlated with increased levels of mineral nutrients, carbohydrates and proline, and decreased levels of lipid peroxidation and Al accumulation. **Journal of Plant Physiology**, v.165, p.385-396, 2008.
- HAMIDOU, F.; ZOMBRE, G.; DOIUF, O.; DIOP, N.N.; GUINKO, S.; BRACONNIER, S. Physiological, biochemical and agromorphological responses of five cowpea genotypes (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) to water deficit under glasshouse conditions. **Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement**, v.11, p.225-234, 2007.
- HONGBO, S.; ZONGSUO, L.; MINGAN, S. Osmotic regulation of 10 wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes at soil water deficits. **Colloids and Surfaces B: Biointerfaces**, v.47, p.132-139, 2006.
- ILLÉS, P.; SCHLICHT, M.; PAVLOVKIN, J.; LICHTSCHEIDL, I.; BALUSKA, F.; OVECKA, M. Aluminium toxicity in plants: internalization of aluminium into cells of the transition zone in *Arabidopsis* root apices related to changes in plasma membrane potential, endosomal behaviour, and nitric oxide production. **Journal of Experimental Botany**, v.57, p.4201-4213, 2006.
- KAVI KISHOR, P.B.; SANGAM, S.; AMRUTHA, R.N.; SRI LAXMI, P.; NAIDU, K.R.; RAO, S.S.; RAO, S.; REDDY, K.J.; THERIAPPAN, P.; SREENIVASULU, N. Regulation of proline biosynthesis, degradation, uptake and transport in higher plants: its implications in plant growth and abiotic stress tolerance. **Current Science**, v.88, p.424-438, 2005.
- LIZANA, C.; WENTWORTH, M.; MARTINEZ, J.P.; VILLEGAS, D.; MENESES, R.; MURCHIE, E.H.; PASTENES, C.; LERCARI, B.; VERNIERI, P.; HORTON, P.; PINTO, M. Differential adaptation of two varieties of common bean to abiotic stress. I. Effects of drought on yield and photosynthesis. **Journal of Experimental Botany**, v.57, p.685-697, 2006.
- MANIVANNAN, P.; ABDUL JALEEL, C.; SANKAR, B.; KISHOREKUMAR, A.; SOMASUNDARAM, R.; LAKSHMANAN, G.M.A.; PANNEERSELVAM, R. Growth, biochemical modifications and proline metabolism in *Helianthus annuus* L. as induced by drought stress. **Colloids and Surfaces B: Biointerfaces**, v.59, p.141-149, 2007.
- MANLY, B.F.J. **Multivariate statistical methods**. 2nd ed. London: Chapman & Hall, 1994. 215p.
- MARIN, A. **Influência associada do estresse hídrico e do alumínio na germinação e crescimento inicial do guandu (*Cajanus cajan* (L.) Millsp.)**. 2003. 87p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal.
- MARIN, A.; SANTOS, D.M.M. dos; BANZATTO, D.A.; CODOGNOTTO, L.M. Influência da disponibilidade hídrica e

- da acidez do solo no teor de prolina livre de guandu. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.41, p.355-358, 2006.
- MITTLER, R. Abiotic stress, the field environment and stress combination. **Trends in Plant Science**, v.11, p.15-19, 2006.
- MOREL, F.; PICCOLO, G. **Evaluación del “Guandú” (*Cajanus cajan* Millsp.) como especie recuperadora de la fertilidad del suelo**. Cerro Azul: INTA, 1999. Disponível em: <http://www.inta.gov.ar/cerroazul/investiga/suelos_anuales/guandu.htm>. Acesso em: 14 abr. 2006.
- MOSSOR-PIETRASZEWSKA, T. Effect of aluminium on plant growth and metabolism. **Acta Biochimica Polonica**, v.48, p.673-686, 2001.
- NARAYANAN, A.; SYAMALA, R. Response of pigeonpea (*Cajanus cajan* (L.) Millsp.) genotypes to aluminium toxicity. **Indian Journal of Plant Physiology**, v.32, p.17-24, 1989.
- OMAMI, N.E. **Response of amaranth to salinity stress**. 2005. 235p. Tese (Doutorado) - University of Pretoria, Pretoria.
- ROUT, G.R.; SAMANTARAY, S.; DAS, P. Aluminium toxicity in plants: a review. **Agronomy for Sustainable Development**, v.21, p.3-21, 2001.
- SAMAC, D.A.; TESFAYE, M. Plant improvement for tolerance to aluminum in acid soils: a review. **Plant Cell Tissue And Organ Culture**, v.75, p.189-207, 2003.
- SHARMA, P.; DUBEY, R.S. Modulation of nitrate reductase activity in rice seedlings under aluminium toxicity and water stress: role of osmolytes as enzyme protectant. **Journal of Plant Physiology**, v.162, p.854-864, 2005.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 3.ed. Porto Alegre: Artmed, 2004. 719p.
- TENNANT, D.A. Test of a modified line intersect method of estimating root length. **Journal of Ecology**, v.63, p.995-1001, 1975.
- ZAFNEJAD, M.; CLARK, R.B.; SULLIVAN, C.Y. Aluminum and water stress effects on growth and proline of sorghum. **Journal of Plant Physiology**, v.150, p.338-344, 1997.
- ZHANG, J.; HE, Z.; TIAN, H.; ZHU, G.; PENG, X. Identification of aluminium-responsive genes in rice cultivars with different aluminium sensitivities. **Journal of Experimental Botany**, v.58, p.2269-2278, 2007.

Recebido em 20 de fevereiro de 2008 e aprovado em 10 de setembro de 2008