

SISTEMA RADICULAR DO ARROZ DE TERRAS ALTAS SOB DEFICIÊNCIA HÍDRICA¹

Cleber Morais Guimarães², Luís Fernando Stone²,
Jaison Pereira de Oliveira², Paulo Hideo Nakano Rangel², Camilla Alves Pereira Rodrigues³

ABSTRACT

UPLAND RICE ROOT SYSTEM UNDER WATER DEFICIT

The root system morphology is one of the most important characteristics in the adaptation of plants to water stress. So, the objective of this study was to analyse important morphologic aspects, regarding the drought tolerance of the root system of upland rice cultivars cultivated under water stress conditions in a greenhouse, in order to discriminate lines to areas with uneven rainfall distribution. Thus, 37 cultivars with broad genetic divergence were sown in PVC tubes (25 cm diameter and 80 cm height) filled with soil, under two hydric regimes: without and with (reposition of about 50% of evapotranspired water) water stress, applied after the panicle emergence. Root density, evaluated at harvest from surface to 80 cm depth, at 20 cm intervals, differed among the cultivars. Muruim Branco, Cano Roxo, Amarelão/Douradão, and Arroz Agulhinha cultivars showed high root density under water deficit as well as under adequate water availability. The root density of upland rice cultivars, measured in soil columns, was positively related to the drought tolerance of these cultivars, under field conditions. This methodology can be considered a valuable technique for screening upland rice cultivars for drought tolerance.

KEY-WORDS: Rice cultivars; screening for drought tolerance; leaf temperature; root density.

RESUMO

A morfologia do sistema radicular é uma das características importantes na tolerância de plantas à deficiência hídrica. Assim, objetivou-se verificar aspectos morfológicos de importância, quanto à tolerância à deficiência hídrica do sistema radicular de cultivares de arroz de terras altas, cultivadas sob deficiência hídrica, em condições de casa-de-vegetação, para discriminar linhagens para regiões com distribuição irregular de chuvas. Para tanto, foram semeadas 37 cultivares com ampla variabilidade genética, em tubos de PVC (25 cm de diâmetro e 80 cm de altura) com solo, submetidas, após a emissão das panículas, a dois regimes hídricos: sem e com deficiência hídrica (reposição de, aproximadamente, 50% da água evapotranspirada). A densidade radicular foi avaliada na colheita dos grãos (de 20 cm em 20 cm), da superfície até 80 cm de profundidade, tendo as cultivares diferido quanto a esta característica. As cultivares Muruim Branco, Cano Roxo, Amarelão/Douradão e Arroz Agulhinha apresentaram alta densidade radicular, tanto sob deficiência como sob adequada disponibilidade hídrica. A densidade radicular de cultivares de arroz de terras altas, avaliada em colunas de solo, se relacionou, positivamente, com a tolerância à deficiência hídrica destas cultivares, em condições de campo. Esta metodologia constitui-se em importante ferramenta de fenotipagem, para tolerância à deficiência hídrica em arroz.

PALAVRAS-CHAVE: Cultivares de arroz; seleção para tolerância à seca; temperatura das folhas; densidade de raízes.

INTRODUÇÃO

O efeito da deficiência hídrica sobre as plantas é cada vez mais preocupante, tanto nos sistemas naturais como nos agrícolas. Isto se deve à necessidade de se manter, ou mesmo aumentar, a produtividade agrícola em terras marginais e ao impacto potencial que as mudanças climáticas podem ter na distribuição das chuvas. Sob este enfoque, há interesse em se avaliar a tolerância à deficiência hídrica, por meio de parâmetros morfofisiológicos, chamados de parâmetros

secundários de avaliação, por apresentarem-se, muitas vezes, mais fáceis de serem avaliados, principalmente se são constitutivos, passíveis de serem avaliados na fase inicial de desenvolvimento das plantas ou identificados usando-se marcadores moleculares (Lafitte & Courtois 2002). Neste contexto, o desafio é encontrar parâmetros secundários que subsidiem a tolerância das plantas à baixa disponibilidade de água no solo e que se correlacionem com a produtividade neste ambiente.

A primeira reação das plantas, ao serem submetidas à deficiência hídrica, é reduzir o potencial

1. Trabalho recebido em dez./2009 e aceito para publicação em jan./2011 (n° registro: PAT 8460/ DOI 10.5216/pat.v41i1.8460).

2. Embrapa Arroz e Feijão, Santo Antônio de Goiás, GO, Brasil. E-mails: cleber@cnpaf.embrapa.br, stone@cnpaf.embrapa.br, jaison@cnpaf.embrapa.br, phrangel@cnpaf.embrapa.br.

3. Universidade Federal de Goiás, Faculdade de Nutrição, Goiânia, GO, Brasil. E-mail: rodrigues_camilla@yahoo.com.br.

osmótico e, conseqüentemente, hídrico das raízes, no intuito de gerar um gradiente de potencial capaz de promover a absorção de água, a partir do solo, ou reduzir a transpiração, de tal maneira que a planta mantenha um balanço positivo de água. Esta tendência é observada sob deficiência hídrica moderada ou severa de curta duração. Segundo Steinmetz et al. (1988), veranicos de seis a dez dias podem ocorrer com frequência de até 20%, nas regiões brasileiras produtoras de arroz de terras altas. Nestas circunstâncias, o aumento e a melhor distribuição do sistema radicular, a maior eficiência na absorção de água e o aumento da sensibilidade estomática podem contribuir para a manutenção da produtividade (Kramer & Boyer 1995).

O arroz reage à deficiência hídrica com reduções na altura das plantas, área foliar e produção de biomassa, aborto de perfilhos, mudanças na massa seca das raízes e na profundidade de enraizamento e atraso no desenvolvimento reprodutivo. A partição de assimilados entre raiz e parte aérea, contudo, não é afetada pela deficiência hídrica, quando o estresse é imposto gradualmente. Por outro lado, sob estresse severo, as raízes cessam o seu crescimento (Asch et al. 2005). Estes efeitos são consequência da redução na taxa de assimilação de CO_2 e de transpiração, na condutância estomática e no potencial de água na folha (Machado et al. 1996). Ao avaliarem os efeitos da deficiência hídrica, na fase reprodutiva, estes autores verificaram que, no estágio de formação dos grãos, a deficiência hídrica causou redução de 16% na produção de panículas e houve, também, remobilização de reservas, a partir do colmo, indicando que a fonte limitou o pleno crescimento dos grãos. Adicionalmente, verificaram que a deficiência hídrica, na floração, causou redução de 37% na massa das panículas, possivelmente devido à menor dimensão do dreno.

Conforme Fukai & Inthapan (1988), o arroz de terras altas, o milho e o sorgo apresentam desenvolvimento radicular e absorção de água similares, até 60 cm de profundidade, entretanto, abaixo desta, a extração de água pelo arroz é baixa, sendo este o fator responsável pela sua maior sensibilidade à deficiência hídrica. Yoshida & Hasegawa (1982) relataram que há grande variabilidade genotípica para densidade radicular abaixo de 30 cm de profundidade. A propósito, os autores usaram a relação biomassa das raízes mais profundas/parte aérea como índice de resistência à deficiência hídrica. Após

avaliarem um número considerável de linhagens, verificaram que as que apresentaram maior relação sistema radicular profundo/parte aérea perfilhavam menos e apresentavam porte mais alto, como observado, geralmente, nos ideotipos tradicionais de arroz de terras altas. Funkai & Cooper (1995) relataram que linhagens com menor número de perfilhos apresentaram raízes mais grossas e em menor número, porém, mais profundas no solo. Raízes com maior diâmetro apresentam elementos de vaso do xilema mais grossos, os quais oferecem menor resistência ao fluxo de água.

Este trabalho teve como objetivo verificar aspectos morfológicos de importância quanto à tolerância à deficiência hídrica do sistema radicular de cultivares de arroz de terras altas, cultivadas sob deficiência hídrica, em condições de casa-de-vegetação, para discriminar linhagens para as regiões com distribuição irregular de chuvas.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado em casa-de-vegetação, na Embrapa Arroz e Feijão, em Santo Antônio de Goiás (GO), em 2005. Foi utilizado um Latossolo Vermelho distrófico, cujas análises química e granulométrica apresentaram os seguintes resultados: $\text{pH} (\text{H}_2\text{O}) = 5,0$; $\text{Ca}^{2+} = 3,6 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$; $\text{Mg}^{2+} = 1,7 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$; $\text{Al}^{3+} = 2 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$; $\text{P} = 0,5 \text{ mg dm}^{-3}$; $\text{K} = 19 \text{ mg dm}^{-3}$; matéria orgânica = 27 g dm^{-3} , areia = 430 g kg^{-1} ; silte = 80 g kg^{-1} ; e argila = 490 g kg^{-1} .

Foram conduzidos dois experimentos, em delineamento experimental de blocos ao acaso, no esquema de parcelas subdivididas, com três repetições. As parcelas foram colunas de solo, acondicionadas em tubos de PVC de 25 cm de diâmetro e 80 cm de altura, formados de quatro anéis de 20 cm de altura, interligados por fita adesiva, onde foram avaliadas 37 cultivares de arroz (Tabelas 2 e 3), com ampla divergência genética, e as subparcelas quatro profundidades do solo: 0-20 cm, 20-40 cm, 40-60 cm e 60-80 cm. Em um dos experimentos, as cultivares foram mantidas em condições adequadas de umidade no solo (-0,025 MPa, a 15 cm de profundidade) (Stone et al. 1986), durante todo o ciclo, com reposição de água feita na superfície da coluna. No outro, elas foram mantidas nestas condições até o início da floração, quando foram submetidas à deficiência hídrica, até o fim do ciclo, com reposição diária feita na base da coluna de, aproximadamente,

50% da água evapotranspirada, a qual foi monitorada por meio de pesagem.

Foram incorporados 4 g do formulado 04-30-16 ao solo e, a seguir, foram colocadas dez sementes por vaso. Aos sete dias após a emergência, efetuou-se o desbaste, para uma planta por vaso. Foram efetuadas quatro adubações de cobertura, na dose de 2 g de sulfato de amônio por vaso, conforme a demanda apresentada pelas plantas. O sistema radicular foi avaliado na época da colheita dos grãos, de 20 cm em 20 cm, da superfície até 80 cm de profundidade. A separação das raízes presentes nas amostras de solo foi feita por meio do método de suspensão/decação repetitiva. Após a separação, as raízes foram recuperadas do sobrenadante, em peneiras de 0,25 mm, com o auxílio de pinças, e levadas a estufa com circulação forçada de ar, a 80°C, até massa constante, por, aproximadamente, 48 horas, para a determinação da massa seca. A densidade gravimétrica radicular foi obtida pela divisão de sua massa seca (mg) pelo volume das amostras (cm³). Também, foram determinadas a produtividade de grãos, a massa da matéria seca da parte aérea (exceto os grãos) e a temperatura das folhas, a qual foi medida com termômetro infravermelho, durante o estágio reprodutivo, aos 102, 107, e 115 dias após a emergência (DAE), no período de maior demanda atmosférica, entre 13:00 h e 14:00 h. Adicionalmente, em condições de campo, no sítio de fenotipagem da Embrapa Arroz e Feijão, na Estação Experimental da Seagro, em Porangatu (GO), determinou-se, para um grupo menor de cultivares, o índice de susceptibilidade à deficiência hídrica (IS), conforme proposto por Fisher & Maurer (1978), em que $IS = (Y_{sdh} - Y_{cdh}) / (Y_{sdh} \times D)$, sendo $D = 1 - YM_{cdh} / YM_{sdh}$; Y_{sdh} e Y_{cdh} as produtividades individuais, sem e com deficiência hídrica, respectivamente; e YM_{cdh} e YM_{sdh} as produtividades médias do experimento, com e sem deficiência hídrica, respectivamente.

Semelhantemente ao ensaio em colunas, em um dos experimentos, as cultivares foram mantidas em condições adequadas de umidade no solo (Stone et al. 1986), durante todo o ciclo. No outro, esta condição foi mantida apenas até 25 DAE, quando foi iniciado o tratamento com deficiência hídrica. As irrigações no ensaio sem deficiência hídrica, e até 25 DAE do segundo ensaio, foram controladas com tensiômetros, sendo aplicados, aproximadamente, 25 mm de água, quando o potencial mátrico do solo, a 15 cm de profundidade, atingia -0,025 MPa. Durante o período de deficiência hídrica, aplicou-se,

aproximadamente, metade da lâmina de água aplicada no ensaio sem deficiência hídrica. A produtividade foi determinada em 6,4 m² e ajustada para 13% de umidade.

Foi feita a análise conjunta dos experimentos e as médias foram submetidas a análise de regressão. Pela análise multivariada, procurou-se agrupar as cultivares, considerando-se as densidades radiculares por profundidade do solo (0-20 cm, 20-40 cm, 40-60 cm e 60-80 cm) e por experimento, com e sem deficiência hídrica, por meio do método de Ward (Ward 1963), que consiste no agrupamento de dados, de maneira a atingir sempre o menor erro interno, entre os vetores que compõem cada grupo e o vetor médio do grupo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As cultivares diferiram, significativamente (1%), quanto à densidade do sistema radicular, a qual foi afetada pela disponibilidade hídrica e profundidades de amostragem (Tabela 1). Houve, também, interação significativa entre cultivares e profundidades de amostragem do sistema radicular e entre estes fatores e a disponibilidade hídrica, portanto, foram agrupadas por disponibilidade hídrica e por profundidade de amostragem, pelo método de Ward (Ward 1963) (Tabelas 2 e 3).

Verificou-se que, sob deficiência hídrica, o grupo com maior densidade radicular, à profundidade de 60-80 cm, foi composto pelas cultivares Muruim Branco (CA790241), Agulhinha Tardio (CA800143) e Vermelhão (CA800150). Estas apresentaram, nesta profundidade, densidade radicular média de 2,159 mg cm⁻³.

Tabela 1. Resumo da análise de variância, para a densidade do sistema radicular de 37 cultivares de arroz, submetidas a duas condições hídricas e diferentes profundidades (Santo Antônio de Goiás, GO, 2005).

Fonte de variação	G. L.	Quadrado médio
Disponibilidade hídrica (A)	1	2,54*
Blocos (disponibilidade hídrica)	4	1,76**
Cultivares (C)	36	1,49**
A x C	36	0,41 ^{ns}
Erro a	144	0,44
Profundidade (P)	3	47,51**
A x P	3	0,41 ^{ns}
C x P	108	0,36**
A x C x P	108	0,30*
Erro b	444	0,24

^{ns} F não-significativo a 5%. * F significativo a 5%. ** F significativo a 1%.

Tabela 2. Agrupamentos de genótipos de arroz de terras altas submetidos a deficiência hídrica, segundo o método de Ward (Santo Antônio de Goiás, GO, 2005).

Genótipos (nº BAG)	Genótipos (nome)	Com deficiência hídrica							
		Densidade radicular (mg cm ⁻³)							
		0-20 cm		20-40 cm		40-60 cm		60-80 cm	
CA790241	Muruim Branco	3,904	a	1,394	b	1,485	a	2,305	a
CA800143	Agulhinha Tardio	1,509	c	1,245	c	1,436	a	2,070	a
CA800150	Vermelhão	2,387	b	1,014	c	1,104	b	2,102	a
CA780033	Enche Tulha	2,160	b	0,844	d	0,754	d	1,490	b
CA780281	Cano Roxo	2,381	b	1,322	b	0,882	c	1,483	b
CA780336	Pratão Goiano	1,098	d	0,705	d	0,548	e	1,481	b
CA780357	Araçatuba	2,548	b	1,778	a	1,207	b	1,554	b
CA800020	Douradão/Amarelão	2,242	b	1,464	b	0,784	d	1,560	b
CA790301	Ligeiro	1,983	c	0,871	d	0,840	d	1,678	b
CA800068	Amarelão/Douradão	1,817	c	1,383	b	1,160	b	1,631	b
CA800178	Arroz Agulhinha	2,118	b	1,608	a	1,134	b	1,857	b
CA780158	Cajueira Liso	2,446	b	1,453	b	0,940	c	1,313	c
CA790359	Toró Vermelho	2,241	b	0,884	d	0,889	c	1,347	c
CA800082	Brejeiro	1,620	c	1,458	b	0,893	c	1,371	c
CA780301	Maranhão (Verdadeiro)	1,703	c	1,058	c	0,898	c	1,153	c
CA790337	Muruim Branco	3,650	a	1,637	a	1,479	a	1,131	c
CA780324	Cacho Duplo	1,513	c	1,001	c	0,954	c	1,199	c
CA790176	Buriti Vermelho	2,285	b	1,435	b	1,133	b	1,173	c
CA800091	Quebra Cacho	1,907	c	1,074	c	0,820	d	1,167	c
CA780329	Comum Creolo	1,568	c	1,150	c	0,804	d	1,228	c
CA790238	Jatobá	2,065	b	1,212	c	0,891	c	1,233	c
CA800034	Iguape sem Aresta	2,259	b	0,960	c	0,785	d	1,242	c
CA780059	Maruim	2,403	b	1,036	c	0,829	d	1,005	d
CA780217	Puteca	3,187	a	1,177	c	0,927	c	1,017	d
CA800015	Douradão	2,178	b	1,434	b	0,986	c	1,028	d
CA790346	Nenen	1,599	c	1,084	c	0,811	d	0,974	d
CA780261	Prata Branco	1,710	c	1,059	c	1,026	c	1,089	d
CA780299	Meruim Ligeiro	1,008	d	0,621	d	0,567	e	1,085	d
CA800081	Brejeiro/Nenenzinho	2,306	b	1,100	c	1,002	c	1,076	d
CA780295	Santo Américo	1,917	c	0,860	d	0,677	d	1,102	d
CA780044	Cateto Seda	0,803	d	0,828	d	0,716	d	0,868	e
CA790282	Chatão Vermelho	1,645	c	1,037	c	0,812	d	0,872	e
CA780202	Arroz Maranhão	2,046	b	1,133	c	0,697	d	0,842	e
CA780287	Paulista Dourado	0,893	d	0,559	d	0,600	e	0,749	e
CA790328	Vermelho	1,575	c	0,813	d	1,043	c	0,789	e
CA790032	Palha Murcha	1,912	c	0,908	d	0,640	e	0,702	e
CA780308	Amarelão Ligeiro	3,313	a	0,697	d	0,516	e	0,579	e
Média		2,051		1,116		0,910		1,258	
CV (%)		8,51		7,92		5,63		7,71	

Médias seguidas de mesma letra, na coluna, não diferem, significativamente, entre si (teste t, a 5%).

Entre elas, a Muruim Branco (CA790241) classificou-se, sob as mesmas condições hídricas, também no grupo com sistema radicular mais desenvolvido, nas camadas de 40-60 cm e 0-20 cm de profundidade, e, no segundo grupo, na camada de 20-40 cm de profundidade (Tabela 2). Esta mesma cultivar, sob condições hídricas adequadas, manteve bom desenvolvimento radicular (grupos 1 e 2), nas camadas mais profundas

do solo (Tabela 3). Os dados sugerem que esta é uma característica constitutiva da cultivar, pois manifestou-se mesmo no tratamento sem deficiência hídrica. Por outro lado, verificou-se que mecanismos de tolerância à seca foram acionados pelo efeito da deficiência hídrica, pois a densidade radicular, mesmo avaliada como característica genética constitutiva, nesta cultivar, aumentou em todo o perfil avaliado do solo.

Tabela 3. Agrupamentos de genótipos de arroz de terras altas, sob adequada disponibilidade hídrica, segundo o método de Ward (Santo Antônio de Goiás, GO, 2005).

Genótipos (nº BAG)	Genótipos (nome)	Sem deficiência hídrica			
		Densidade radicular (mg cm ⁻³)			
		0-20 cm	20-40 cm	40-60 cm	60-80 cm
CA780261	Prata Branco	1,363 d	1,024 c	1,088 b	1,870 a
CA790328	Vermelho	2,110 c	0,943 d	0,858 c	1,857 a
CA790241	Muruim Branco	1,925 c	1,262 b	1,052 b	1,811 a
CA780281	Cano Roxo	1,564 d	1,027 c	1,153 b	1,608 b
CA800068	Amarelão/Douradão	1,696 d	1,191 b	0,759 d	1,626 b
CA800178	Arroz Agulhinha	3,312 a	1,619 a	0,870 c	1,555 b
CA780301	Maranhão (Verdadeiro)	2,297 b	1,375 b	1,177 b	1,384 b
CA780324	Cacho Duplo	1,191 e	1,009 c	0,925 c	1,339 b
CA790032	Palha Murcha	1,204 e	1,007 c	0,658 e	1,448 b
CA780033	Enche Tulha	1,826 c	1,232 b	0,986 b	1,208 c
CA800082	Brejeiro	1,633 d	1,112 c	0,846 c	1,212 c
CA780202	Arroz Maranhão	1,827 c	1,623 a	0,848 c	1,196 c
CA790337	Muruim Branco	1,980 c	1,667 a	1,232 b	1,247 c
CA780059	Maruim	2,656 b	1,103 c	0,868 c	1,178 c
CA800034	Iguape sem Aresta	1,654 d	1,534 a	0,656 e	1,150 c
CA780295	Santo Américo	1,605 d	0,895 d	0,721 d	1,080 c
CA790238	Jatobá	2,343 b	1,167 b	0,834 c	1,078 c
CA800020	Douradão/Amarelão	1,527 d	0,935 d	0,828 c	1,077 c
CA780357	Araçatuba	2,547 b	1,779 a	0,464 e	1,100 c
CA800143	Agulhinha Tardio	2,409 b	1,232 b	0,905 c	1,086 c
CA790359	Toró Vermelho	2,485 b	1,032 c	0,923 c	1,050 c
CA780336	Pratão Goiano	1,002 e	0,807 d	0,775 d	1,113 c
CA790346	Nenen	2,633 b	1,104 c	0,897 c	1,110 c
CA800081	Brejeiro/Nenezinho	1,739 d	1,163 b	1,485 a	1,119 c
CA780044	Cateto Seda	1,447 d	0,895 d	0,625 e	0,902 d
CA780287	Paulista Dourado	0,841 e	0,721 e	0,576 e	0,892 d
CA790176	Buriti Vermelho	1,701 d	0,852 d	0,668 e	0,849 d
CA790282	Chatão Vermelho	1,786 c	0,886 d	0,732 d	0,845 d
CA780299	Meruim Ligeiro	0,842 e	0,705 e	0,606 e	0,766 d
CA800150	Vermelhão	1,869 c	0,944 d	0,725 d	0,776 d
CA780158	Cajueira Liso	2,249 b	1,082 c	0,699 d	0,981 d
CA800015	Douradão	2,081 c	1,056 c	0,819 c	0,987 d
CA780217	Puteca	2,376 b	1,240 b	0,793 d	0,972 d
CA800091	Quebra Cacho	1,522 d	1,151 b	0,706 d	0,966 d
CA780329	Comum Creolo	1,668 d	0,607 e	0,595 e	0,956 d
CA780308	Amarelão Ligeiro	1,027 e	0,801 d	0,595 e	0,659 d
CA790301	Ligeiro	1,723 d	0,967 d	0,485 e	0,648 d
Média		1,829	1,101	0,823	1,154
CV (%)		7,18	5,60	6,97	8,18

Médias seguidas de mesma letra, na coluna, não diferem, significativamente, entre si (teste t, a 5%).

Resultados similares foram encontrados por Asch et al. (2005), os quais observaram maior percentagem de massa seca radicular, sob deficiência hídrica imposta gradualmente, nas camadas mais profundas das colunas de solo. Esta disposição do sistema radicular não foi atribuída à gradiente de umidade do solo, que, devido ao método de irrigação utilizado, foi quase constante, no perfil do solo. Estes autores

acrescentaram que a partição de carboidratos, entre parte aérea e raízes, não foi afetada pela deficiência hídrica e que, em nenhum momento, houve partição extra de carboidratos para as raízes, pelo contrário, a partição de carboidratos para as raízes foi completamente interrompida sob condições de deficiência hídrica severa. Azhiri-Sigari et al. (2000) atribuíram esta disposição do sistema radicular a um padrão

interno radicular de partição, em favor de raízes mais profundas, em condições de deficiência hídrica. Contudo, nem estes autores nem Asch et al. (2005) determinaram se o aumento na biomassa radicular, nas camadas mais profundas do solo, foi devido ao crescimento de novas raízes, à alongação de raízes velhas, à ramificação de raízes ou à combinação destas possibilidades. Neste experimento, isto também não foi determinado, mas o método de irrigação usado na aplicação da deficiência hídrica, reposição diária feita na base da coluna de, aproximadamente, 50% da água evapotranspirada, pode explicar as alterações no padrão de distribuição radicular, favorecendo a produção de biomassa radicular em profundidade de algumas cultivares.

As demais cultivares, Agulhinha Tardio (CA800143) e Vermelhão (CA800150), com classificação sob deficiência hídrica no grupo com melhor sistema radicular, na camada de 60-80 cm, quando sob condições de irrigação adequada, foram classificadas nos grupos com sistema radicular pouco desenvolvido. Os dados sugerem que o mecanismo de aumento do sistema radicular, nestas duas cultivares, foi acionado pelo efeito da deficiência hídrica, certamente pelo ajuste osmótico na zona de crescimento das raízes. Este induz aumento do potencial de pressão, que favorece o alongamento e a divisão celular e, por conseguinte, o crescimento radicular. O acionamento de mecanismo de adaptação às condições de deficiência hídrica é desejável, entretanto, pode não se adequar à planta em tempo hábil para suportar as condições hídricas impostas pelos veranicos severos e imprevisíveis, comuns nas regiões do Cerrado produtoras de arroz de terras altas. Daí, a importância da característica constitutiva, por ser preventiva aos efeitos da deficiência hídrica.

O segundo grupo, com sistema radicular mais desenvolvido na camada inferior das colunas de solo sob condições de deficiência hídrica, foi composto de oito cultivares (Tabela 2), dentre as quais destacam-se Cano Roxo (CA780281), Amarelão/Douradão (CA800068) e Arroz Agulhinha (CA800178), que, também, apresentaram alta densidade radicular nesta camada, sob adequada disponibilidade hídrica (Tabela 3).

Foram classificadas, ainda, sob deficiência hídrica, na camada basal da coluna de solo, onze cultivares no terceiro grupo, oito cultivares no quarto grupo, e, no quinto grupo, as sete cultivares com os menores sistemas radiculares: Cateto

Seda (CA780044), Chatão Vermelho (CA790282), Arroz Maranhão (CA780202), Paulista Dourado (CA780287), Vermelho (CA790328), Palha Murcha (CA790032) e Amarelão Ligeiro (CA780308). Esta cultivar, ao contrário das demais, apresentou alta concentração radicular na camada superficial (0-20 cm), onde concentrou 64,91% de todo o sistema radicular, enquanto, nas demais camadas (20-40 cm, 40-60 cm e 60-80 cm), foram observados 13,65%, 10,10% e 11,34%, respectivamente. Por outro lado, a Muruim Branco, apesar de apresentar alta quantidade de raízes na camada superficial, como discutido anteriormente, apresentou melhor distribuição nas camadas inferiores. Foram observados 42,96%, 15,33%, 16,34% e 25,36% do sistema radicular, nas camadas 0-20 cm, 20-40 cm, 40-60 cm e 60-80 cm, respectivamente (Tabela 2).

O crescimento radicular em profundidade, sob deficiência hídrica no solo, como discutido anteriormente, é explicado pelo ajuste osmótico nas células da zona de crescimento radicular. Conforme a revisão bibliográfica apresentada por Fukai & Cooper (1995), há ampla variação de ajuste osmótico (0,4-1,7 MPa) entre linhagens de arroz, com adaptação diversa. Os mecanismos pelos quais o ajuste osmótico influencia o comportamento da planta, em condições de deficiência hídrica, são mais bem estudados em sorgo. Segundo Ludlow & Muchow (1990) e Santamaria et al. (1990), híbridos com maior capacidade de ajuste osmótico produzem melhor, quando submetidos a períodos longos de deficiência hídrica, na fase reprodutiva, por apresentarem maior capacidade de extrair água do solo, manter os grãos e remobilizar carboidratos.

A densidade radicular média observada nas colunas de solo, conduzidas em condições de casa-de-vegetação, e o índice de susceptibilidade à deficiência hídrica, para um menor número de cultivares, determinado em condições de campo, correlacionaram-se negativamente (Figura 1), sinalizando que as cultivares com maior tolerância à deficiência hídrica, em condições de campo, apresentaram maior densidade radicular nas colunas de solo conduzidas em condições de casa-de-vegetação. Desta maneira, a avaliação do sistema radicular, neste ambiente, por ser menos trabalhosa e onerosa, constitui-se em importante ferramenta de fenotipagem, para tolerância à deficiência hídrica. Guimarães et al. (2006) também observaram que a maior densidade radicular, nas camadas mais profundas de

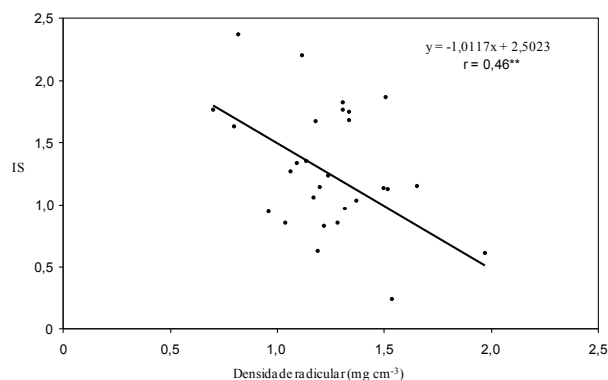


Figura 1. Densidade radicular das cultivares de arroz de terras altas, avaliadas em colunas de solo de 80 cm de profundidade, sob condições de deficiência hídrica, em função do índice de susceptibilidade à deficiência hídrica (IS), avaliado em condições de campo (Santo Antônio de Goiás, GO, 2005).

colunas de solo, conduzidas em ambiente controlado, se correlacionou com a tolerância à deficiência hídrica das mesmas cultivares, quando avaliada em condições de campo.

O'Toole (1982) sugere que a adaptação do arroz às condições de distribuição irregular de chuvas, porém com boa reserva de água nas camadas mais profundas do solo, dá-se pelo aumento da profundidade do sistema radicular, densidade radicular, relação raiz-parte aérea, condutância das raízes e pelo ajuste osmótico do sistema radicular, que mantém o potencial de pressão das células, com a redução do seu potencial de água. Este mecanismo garante a manutenção do crescimento radicular e a absorção de água. Nguyen et al. (1997) e Fukai et al. (1999) confirmaram a variabilidade fenotípica em arroz, para sistemas radiculares mais profundos, com maior

capacidade de penetrar em camadas compactadas e extrair água mais eficientemente do solo.

Puckridge & O'Toole (1981) também observaram variabilidade fenotípica para o sistema radicular e verificaram maior extração de água, na camada do solo de 40-70 cm de profundidade, pela cultivar de arroz Kinandang Patong, comparativamente às cultivares IR 20 e IR 36, que apresentam sistema radicular superficial. Lilley & Fukai (1994a) também observaram que o aumento do sistema radicular de cultivares de arroz promoveu a extração de água e melhor estado hídrico. Cultivares com maior comprimento radicular comportam-se melhor que outras sob condições de deficiência hídrica moderada, porém, o mesmo não é observado para as condições de períodos prolongados de deficiência hídrica. A vantagem do sistema radicular bem desenvolvido se dá, principalmente, para as condições de distribuição irregular de chuvas, com veranicos curtos (Lilley & Fukai 1994b).

A biomassa da parte aérea se correlacionou positivamente com a densidade radicular, em todas as camadas amostradas (Tabela 4), sinalizando que a partição de carboidratos entre parte aérea e raízes não foi afetada pela deficiência hídrica, corroborando os resultados de Asch et al. (2005). Contudo, verificou-se que ela se correlacionou negativamente com a produtividade de grãos, devido, possivelmente, ao aumento da área transpirante, com o incremento da biomassa da parte aérea, induzindo, sob deficiência hídrica, ao mais rápido fechamento dos estômatos e, assim, à menor fixação de carbono e, como consequência, à menor produtividade de grãos. Isto pode ser confirmado ao se observar a correlação positiva entre temperatura das folhas e biomassa da parte aérea das plantas (Tabela 4), em

Tabela 4. Coeficiente de correlação entre a produtividade de grãos (Prod), biomassa seca da parte aérea (MS), densidade radicular de 0-20 cm (Raiz₀₋₂₀), 20-40 cm (Raiz₂₀₋₄₀), 40-60 cm (Raiz₄₀₋₆₀) e 60-80 cm (Raiz₆₀₋₈₀) de profundidade e temperatura das folhas (T_{folhas}), em condições de deficiência hídrica (Santo Antônio de Goiás, GO, 2005).

	Prod ¹	MS	Raiz ₀₋₂₀	Raiz ₂₀₋₄₀	Raiz ₄₀₋₆₀	Raiz ₆₀₋₈₀
MS	-0,501 (0,002)					
Raiz ₀₋₂₀	0,049 (0,773)	0,305 (0,066)				
Raiz ₂₀₋₄₀	-0,232 (0,167)	0,659 (<0,001)	0,477 (0,003)			
Raiz ₄₀₋₆₀	-0,401 (0,014)	0,704 (<0,001)	0,470 (0,003)	0,698 (<0,001)		
Raiz ₆₀₋₈₀	-0,556 (<0,001)	0,604 (<0,001)	0,236 (0,160)	0,418 (0,010)	0,591 (<0,001)	
T _{folhas}	-0,327 (0,048)	0,476 (0,005)	0,259 (0,122)	0,433 (0,007)	0,498 (0,002)	0,318 (0,055)

¹ Em cada célula, o primeiro valor corresponde ao coeficiente de correlação e o segundo à significância.

resposta à diminuição da transpiração, pelo fechamento dos estômatos.

A produtividade de grãos, por sua vez, se correlacionou negativamente com as densidades radiculares das camadas mais profundas da coluna de solo (40-60 cm e 60-80 cm de profundidade). Como a reposição de água foi feita diariamente, na base da coluna, as cultivares com maior densidade de raízes em profundidade absorviam mais rapidamente a água e recuperavam, momentaneamente, o seu potencial hídrico. Nestas condições, a transpiração ocorria sem restrições, por um curto período, levando, rapidamente, ao esgotamento da água do solo e, assim, em boa parte do dia, estas cultivares permaneciam sob deficiência hídrica, com os estômatos fechados. Isto pode ser confirmado ao se observar a correlação positiva entre temperatura das folhas e densidade radicular, nas camadas mais profundas, e negativa com a produtividade (Tabela 4).

As densidades radiculares de uma determinada camada correlacionaram-se positivamente com as densidades radiculares das camadas imediatamente inferiores (Tabela 4). As plantas com maior densidade radicular, na camada de 0-20 cm de profundidade, apresentaram, também, maiores densidades radiculares nas camadas de 20-40 cm e 40-60 cm de profundidade, mas não, obrigatoriamente, maior densidade radicular na camada basal da coluna (60-80 cm de profundidade). Entretanto, as plantas com maiores densidades radiculares, nas camadas de 20-40 cm e 40-60 cm de profundidade, apresentaram, também, maiores densidades radiculares na camada de 60-80 cm de profundidade.

Nas regiões do Cerrado produtoras de arroz de terras altas, é comum a ocorrência de períodos curtos de deficiência hídrica, embora seja imprevisível o estágio do ciclo da cultura em que acontecerão. Assim, ressalta-se a importância de as cultivares recomendadas para cultivo nestas regiões terem um sistema radicular denso em profundidade, como característica constitutiva. A presente metodologia foi capaz de discriminar as cultivares com esta característica e foi confirmado, em condições de campo, que cultivares com tal característica são mais tolerantes à deficiência hídrica. Assim, a avaliação do sistema radicular do arroz em colunas de solo é perfeitamente viável e constitui-se em importante ferramenta de fenotipagem, auxiliar aos trabalhos de tolerância à deficiência hídrica conduzidos em condições de campo, onde o potencial produtivo das cultivares é melhor avaliado.

CONCLUSÕES

1. As cultivares de arroz de terras altas estudadas diferiram quanto à densidade do sistema radicular, quando cultivadas em colunas de solos, em condições de casa-de-vegetação.
2. As cultivares Muruim Branco, Cano Roxo, Amarelão/Douradão e Arroz Agulhinha apresentaram alta densidade radicular, tanto sob deficiência como sob adequada disponibilidade hídrica.
3. A densidade radicular de cultivares de arroz de terras altas, avaliada em colunas de solo, se relacionou positivamente com a tolerância à deficiência hídrica destas cultivares, em condições de campo.
4. A avaliação do sistema radicular, em condições de casa-de-vegetação, se constitui em importante ferramenta de fenotipagem para tolerância à deficiência hídrica.

AGRADECIMENTOS

Aos projetos Orygens e Generation Challenge Program-DPNetworking, pelo financiamento do trabalho, e a Ramatis Justino da Silva, pelo auxílio na condução da pesquisa.

REFERÊNCIAS

- ASCH, F. et al. Drought-induced changes in rooting patterns and assimilate partitioning between root and shoot in upland rice. *Field Crops Research*, Amsterdam, v. 93, n. 2-3, p. 223-236, 2005.
- AZHIRI-SIGARI, T. et al. Genotypic variation in response of rainfed lowland rice to drought and rewatering. II. Root growth. *Plant Production Science*, Tokyo, v. 3, n. 2, p. 180-188, 2000.
- FISHER, R. A.; MAURER, R. Drought resistance in spring wheat cultivars. I. Grain yield responses. *Australian Journal of Agriculture Research*, Victoria, v. 29, n. 5, p. 897-912, 1978.
- FUKAI, S.; COOPER, M. Development of drought-resistant cultivars using physio-morphological traits in rice. *Field Crops Research*, Amsterdam, v. 40, n. 2, p. 67-86, 1995.
- FUKAI, S.; INTHAPAN, P. Growth and yield of rice cultivars under sprinkler irrigation in south-eastern Queensland. 3. Water extraction and plant water relations - comparison with maize and grain sorghum. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, East Melbourne, v. 28, n. 2, p. 249-252, 1988.

- FUKAI, S. et al. Screening for drought resistance in rainfed lowland rice. *Field Crops Research*, Amsterdam, v. 64, n. 1-2, p. 61-74, 1999.
- GUIMARÃES, C. M. et al. Resistência à seca. III. Avaliação do sistema radicular do arroz de terras altas em condições controladas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DA CADEIA PRODUTIVA DE ARROZ, 2.; REUNIÃO NACIONAL DE PESQUISA DE ARROZ, 8., 2006, Brasília, DF. *Anais...* Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2006. 1 CD-ROM. (Documentos, 196).
- KRAMER, P. J.; BOYER, J. S. *Water relations of plants and soils*. San Diego: Academic Press, 1995.
- LAFITTE, H. R.; COURTOIS, B. Interpreting cultivar × environment interactions for yield in upland rice: assigning value to drought-adaptive traits. *Crop Science*, Madison, v. 42, n. 5, p. 1409-1420, 2002.
- LILLEY, J. M.; FUKAI, S. Effect of timing and severity of water deficit on four diverse rice cultivars. I. Root pattern and soil water extraction. *Field Crops Research*, Amsterdam, v. 37, n. 3, p. 205-214, 1994a.
- LILLEY, J. M.; FUKAI, S. Effect of timing and severity of water deficit on four diverse rice cultivars. III. Phenological development, crop growth and grain yield. *Field Crops Research*, Amsterdam, v. 37, n. 3, p. 225-234, 1994b.
- LUDLOW, M. M.; MUCHOW, R. C. A critical evaluation of the traits for improving crop yield in water limited environments. *Advances in Agronomy*, New York, v. 43, n. 1, p. 107-153, 1990.
- MACHADO, E. C. et al. Trocas gasosas e relações hídricas em dois cultivares de arroz de sequeiro submetidos à deficiência hídrica, em diferentes fases do crescimento reprodutivo. *Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal*, Londrina, v. 8, n. 2, p. 139-147, 1996.
- NGUYEN, H. T.; BABU, R. C.; BLUM, A. Breeding for drought resistance in rice: physiology and molecular genetics considerations. *Crop Science*, Madison, v. 37, n. 5, p. 1426-1434, 1997.
- O'TOOLE, J. C. Adaptation of rice to drought-prone environments. In: IRRI. *Drought resistance in crops with emphasis on rice*. Los Baños: IRRI, 1982. p. 195-213.
- PUCKRIDGE, D. W.; O'TOOLE, J. C. Dry matter and grain production of rice, using a line source sprinkler in drought studies. *Field Crops Research*, Amsterdam, v. 3, n. 4, p. 303-319, 1981.
- SANTAMARIA, J. M.; LUDLOW, M. M.; FUKAI, S. Contribution of osmotic adjustment to grain yield in *Sorghum bicolor* (L.) Moench under water limited conditions. I. Water stress before anthesis. *Australian Journal of Agricultural Research*, Victoria, v. 41, n. 1, p. 51-65, 1990.
- STEINMETZ, S.; REYNIERS, F. N.; FOREST, F. *Caracterização do regime pluviométrico e do balanço hídrico do arroz de sequeiro em distintas regiões produtoras do Brasil: síntese e interpretação dos resultados*. Goiânia: Embrapa-CNPAP, 1988. (Documentos, 23).
- STONE, L. F.; MOREIRA, J. A. A.; SILVA, S. C. da. *Tensão da água do solo e produtividade do arroz*. Goiânia: Embrapa-CNPAP, 1986. (Comunicado técnico, 19).
- WARD, J. H. Hierarchical grouping to optimize an objective function. *Journal of the American Statistical Association*, Washington, DC, v. 58, n. 301, p. 236-244, 1963.
- YOSHIDA, S.; HASEGAWA, S. The rice root system: its development and function. In: IRRI. *Drought resistance in crops with emphasis in rice*. Los Baños: IRRI, 1982. p. 97-114.