

SEÇÃO II - QUÍMICA E MINERALOGIA DO SOLO

OXIDAÇÃO DE FERRO EM RAÍZES DE DOIS CULTIVARES DE ARROZ EM SOLUÇÃO DE SOLO INUNDADO⁽¹⁾

G. NAVA⁽²⁾ & H. BOHNEN⁽³⁾

RESUMO

O arroz cultivado em regime de inundação pode apresentar sintomas de desordens nutricionais semelhantes àqueles descritos quando ocorre toxidez de ferro. Os sintomas não ocorrem com a mesma intensidade em todos os cultivares e têm sido mais frequentes nos cultivares modernos. O objetivo do trabalho foi avaliar, em casa de vegetação, a capacidade das plantas em oxidar o Fe reduzido (Fe^{2+}) sobre a superfície das raízes, comparando duas variedades de arroz com diferentes sensibilidades ao Fe^{2+} em solução (BR IRGA 409 e EPAGRI 108) e duas soluções com diferentes concentrações de Fe^{2+} . O delineamento experimental foi completamente casualizado e consistiu de um fatorial 2^2 com mais um tratamento em branco, no qual as plantas foram mantidas somente em solução nutritiva. Para obter soluções com diferentes concentrações de Fe^{2+} , foram utilizados dois solos (Gleissolo Lâmico e Planossolo Hidromórfico). As plantas foram cultivadas em solução nutritiva completa por 30 dias e, posteriormente, em soluções extraídas dos solos inundados por mais 24 horas. A capacidade oxidativa das plantas foi estimada a partir da quantidade de compostos de Fe acumulados na superfície das raízes. Os cultivares BR IRGA 409 e EPAGRI 108 apresentaram a mesma capacidade de oxidar o Fe^{2+} sobre a superfície das raízes, não sendo a capacidade de oxidação a variável diferenciadora dos dois cultivares quanto à maior ou menor sensibilidade à toxidez de Fe. A solução do Planossolo, por ser mais concentrada em Fe^{2+} (280 mg L^{-1}), promoveu maior precipitação de óxidos sobre as raízes do que a solução do Gleissolo, menos concentrada (118 mg L^{-1}). A camada de óxidos precipitada sobre as raízes do cultivar EPAGRI 108, tolerante à toxidez de Fe, foi menos ativa em adsorver P do que do cultivar BR IRGA 409, considerado sensível.

Termos de indexação: *Oriza sativa*, toxidez de ferro, óxidos de ferro, adsorção de fósforo.

⁽¹⁾ Parte da Tese de Mestrado do primeiro autor, apresentada no Curso de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Recebido para publicação em janeiro de 2001 e aprovado em outubro de 2001.

⁽²⁾ Pesquisador da Estação Experimental de São Joaquim, Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina – EPAGRI. Caixa Postal 81, CEP 88600-000 São Joaquim (SC). E-mail: nava@epagri.rct-sc.br

⁽³⁾ Professor colaborador convidado do Departamento de Solos da Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS. Caixa Postal 776, CEP 91540-000 Porto Alegre (RS). E-mail: bohnen@conex.com.br

SUMMARY: *IRON OXIDATION ON ROOTS OF TWO RICE CULTIVARS IN FLOODED SOIL SOLUTION*

Rice cropped under waterlogged conditions may present symptoms of nutritional disorders similar to those caused by iron (Fe) toxicity. The symptoms do not occur in the same intensity in all cultivars and are more frequent in modern cultivars. The aim of our study was to evaluate the plant capacity of oxidizing reduced iron (Fe²⁺) on the root surface in green house conditions, comparing two rice cultivars (BR IRGA 409 and EPAGRI 108) with different degrees of susceptibility to iron toxicity and two different concentrations of soluble iron. The completely randomized experimental design consisted in a factorial of 2² with an extra treatment in which the plants were maintained in nutritive solution only. In order to obtain solutions with different of Fe²⁺ concentrations, two kinds of soils (Gleysolo Lamico and Planossolo Hidromorfico) were used. The plants were initially cultivated in complete nutrient solution during 30 days and afterwards in solutions extracted from waterlogged soils during 24 hours. The plant oxidative capacity was estimated based on the amounts of Fe compounds on the root surface. BR IRGA 409 expressed the same oxidative capacity as the EPAGRI cultivar, therefore oxidation capacity was not the differentiating variable between the two cultivars in relation to high or low sensitivity to iron toxicity. The Planossolo solution, because of its higher Fe²⁺ concentration (280 mg L⁻¹), allowed a higher accumulation of Fe oxides on roots than the less concentrated Gleysolo solution (118 mg L⁻¹). The oxide plaque on roots of the EPAGRI 108 cultivar, tolerant to iron toxicity, was less active in P adsorption than that of the BR IRGA 409 cultivar, considered sensitive.

Index terms: Oriza sativa, iron toxicity, oxide plaque, phosphorus adsorption.

INTRODUÇÃO

A inundação do solo provoca alterações físico-químicas que afetam a dinâmica e a disponibilidade dos nutrientes para as plantas. A redução do ferro e o conseqüente aumento da solubilidade deste elemento é uma das mais importantes modificações que ocorrem no solo inundado em relação à nutrição do arroz (Ponnanperuma, 1972).

O aumento da solubilidade do Fe²⁺ causa, em alguns solos, o aparecimento de sintomas de desordens nutricionais semelhantes àqueles descritos quando ocorre toxidez de Fe nas plantas. No Brasil, este problema apareceu mais intensamente no início da década de oitenta e, atualmente, atinge a maioria dos estados produtores de arroz irrigado (Stone, 1988). O distúrbio não ocorre com a mesma intensidade em todos os cultivares e tem sido mais freqüente nos cultivares modernos, justamente os de maior potencial produtivo.

As desordens nutricionais associadas à toxidez de Fe podem ser classificadas em toxidez direta, quando causada pela excessiva absorção do elemento pela planta, e em toxidez indireta, causada pela deficiência generalizada de outros nutrientes, geralmente provocada por altos teores de Fe²⁺ (Vahl, 1991).

A toxidez de um elemento, em geral, está diretamente associada à absorção excessiva pela planta. No entanto, a falta de relação entre o teor

de Fe no tecido das plantas e a intensidade dos sintomas de toxidez pelo elemento têm levado a maioria dos pesquisadores da área a rejeitar o mecanismo direto de toxidez.

Nem todo o Fe²⁺ solúvel que chega até às raízes é absorvido pela planta. Parte pode ser precipitada como Fe³⁺ sobre a superfície radicular. A precipitação ocorre como conseqüência da oxidação da rizosfera pelo oxigênio transportado da parte aérea até às raízes, via aerênquima. Armstrong (1969) observou diferenças entre cultivares de arroz em relação à capacidade de transportarem oxigênio até às raízes. Chen et al. (1980) observaram que a quantidade de óxidos que precipitaram na rizosfera foi proporcional à capacidade de oxidação das raízes.

Estes fatos levaram os cientistas ao conceito do mecanismo de exclusão do Fe, descrito por Yoshida (1981), como a fração do Fe²⁺ que atinge as raízes via fluxo de massa e, por permanecer oxidada na rizosfera, não é absorvida. Tal propriedade tem sido freqüentemente usada para explicar a ocorrência ou não da toxidez de Fe em plantas de arroz, sendo aceito nesta linha que, quanto menor for o poder de exclusão do Fe²⁺, maior será o risco da toxidez do elemento.

Howeller (1973) observou a melhor relação entre os sintomas de alaranjamento nas folhas e os seus teores de P, K, Ca e Mg do que entre os sintomas de alaranjamento e os teores de Fe no tecido das plantas e na solução do solo. Baseado neste fato, o autor

atribuiu os sintomas de toxidez como sendo causados pela deficiência generalizada de nutrientes, usualmente provocada por altos teores de Fe^{2+} no meio de cultivo. Segundo o autor, a concentração alta de Fe^{2+} na solução inibe a formação de raízes novas e a camada de óxidos depositada sobre as raízes existentes diminui a capacidade de absorção de nutrientes, acarretando deficiências de P, K, Ca e Mg na parte aérea do vegetal.

Assim, o mecanismo de exclusão estaria agora atuando de maneira favorável à ocorrência de distúrbios nutricionais, agravando ainda mais os efeitos da toxidez indireta de Fe nas plantas. No entanto, Zhang et al. (1999) observaram que a placa de óxido depositada sobre as raízes das plantas de arroz aumentou a adsorção de P, porém também promoveu um aumento da concentração no tecido da parte aérea, evidenciando a maior absorção de P pela planta.

Permanecem dúvidas a respeito da associação entre a camada de óxidos de Fe depositada na superfície das raízes e a ocorrência da toxidez de Fe em plantas de arroz. Este estudo, utilizando solução de solo inundado, objetivou avaliar a capacidade das plantas de arroz em oxidar o Fe sobre a superfície de suas raízes, em condições semelhantes às que ocorrem no campo, onde é difícil quantificar a oxidação do Fe pelas plantas.

MATERIAL E MÉTODOS

Preparo e alagamento dos solos

Foi utilizada a camada superficial (0-40 cm) de dois solos: Planossolo Hidromórfico e Gleissolo Lâmico. No quadro 1, estão listados os resultados da análise química destes solos. Após a coleta, os solos foram secos à sombra e, em seguida, peneirados (peneira de plástico com malha de 6 mm) e colocados em recipientes de cimento amianto (50 L) impermeabilizados com resina acrílica. Colocou-se uma camada de solo até à altura de 10 cm do fundo do recipiente e, acima desta, colocou-se um cano de PVC com 30 cm de comprimento e 12 cm de diâmetro, fechado nas extremidades e perfurado em toda sua superfície com furos de 1 cm de diâmetro, sendo os furos cobertos com tela de nylon número 100.

Neste cano, conectou-se um tubo de vidro até à parte externa do recipiente para que pudesse ser coletada a solução dos solos por gravidade (Figura 1). Em seguida, o volume do recipiente foi completado com solo até à altura de 5 cm da borda. Os solos foram alagados e mantidos nesta condição durante seis meses.

Germinação das sementes e cultivo das plantas

Utilizaram-se dois cultivares de arroz, o BR IRGA 409, considerado sensível à toxidez do Fe (Vahl, 1991), e o EPAGRI 108, considerado tolerante. As sementes foram pré-germinadas entre folhas de papel de filtro, permanentemente umedecidas, até as plântulas apresentarem uma radícula de aproximadamente 2 cm de comprimento, quando foram transplantadas para os recipientes de cultivo. Estes recipientes foram feitos com placas de vidro, coladas entre si com cola de silicone, ficando cada recipiente com dimensões de 40 x 30 x 0,8 cm e com capacidade para armazenar 750 mL de solução. Foram desenvolvidas quatro plântulas por recipiente, as quais foram suportadas com uma tela de nylon colocada na superfície dos recipientes de cultivo.

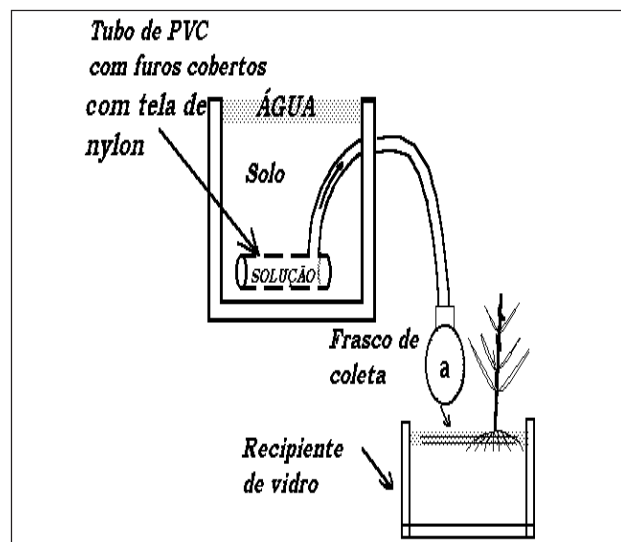


Figura 1. Representação do sistema utilizado no alagamento do solo e cultivo das plantas; (a) recipiente utilizado na extração e homogeneização das soluções dos solos inundados.

Quadro 1. Resultados da análise química realizada anteriormente à inundação dos solos

Solo	Argila	M.O	pH-água	P	K	Al	Ca	Mg	CTC
	— g kg ⁻¹ —			— mg kg ⁻¹ —		— mmolc kg ⁻¹ —			
Planossolo	170	310	5,1	12	149	1	17	7	51
Gleissolo	680	260	5,0	2	62	13	74	47	161

As plantas foram cultivadas em solução nutritiva completa por 30 dias. A solução foi renovada a cada cinco dias, durante as duas primeiras semanas, e a cada três dias, nas últimas semanas. Trinta dias após a emergência das plântulas, vedou-se a superfície dos recipientes com uma camada de resina de silicone de aproximadamente 0,3 cm de espessura, deixando-se somente dois orifícios, um para a substituição da solução e outro para a introdução de gás argônio (gás inerte), que preenchia o volume interno dos recipientes à medida que a solução nutritiva fosse retirada.

Após a vedação, com o auxílio de uma mangueira, succionou-se a solução nutritiva dos recipientes por meio de um dos orifícios, enquanto noutro era colocado o gás argônio, por meio de uma mangueira conectada a um saco plástico. Retirada a solução nutritiva, imediatamente colocou-se a solução extraída dos solos alagados para os recipientes de cultivo. As características destas soluções constam no quadro 2. As determinações dos teores de Fe e Mn destas soluções foram feitas por espectrofotometria de absorção atômica. O pH da solução foi determinado pelo uso de um eletrodo de vidro e o Eh de um eletrodo de platina. As plantas permaneceram na solução dos solos alagados por 24 h.

Após este período, as plantas foram colhidas, sendo a parte aérea separada das raízes. A parte aérea foi seca em estufa a 65°C e, em seguida, moída para análise química. As raízes foram lavadas cuidadosamente com água destilada e cada amostra colocada em um frasco que continha HCl 0,5 mol L⁻¹, por 24 h, período este estipulado em teste preliminar e suficiente para que todos os óxidos precipitados sobre as raízes fossem dissolvidos. Nesta solução, determinou-se a concentração de Fe e Mn, por espectrofotometria de absorção atômica, sendo estas concentrações utilizadas para quantificar o Fe e Mn que precipitaram na forma de óxidos sobre a superfície das raízes. Em seguida, as raízes foram lavadas com água destilada e guardadas em geladeira para determinação do comprimento total pelo método das intersecções em quadrículas (Tennant, 1975). Após, as raízes foram secas em estufa a 65°C, pesadas e moídas para a análise química. A

análise química do material vegetal foi efetuado conforme método descrito por Greweling (1976).

Delineamento experimental e análise estatística

O experimento consistiu de um fatorial 2² (2 soluções de solo e 2 cultivares) e mais um tratamento em branco em que as plantas foram desenvolvidas somente em solução nutritiva. Em cada tratamento, foram feitas três repetições e o delineamento experimental foi completamente casualizado. Na análise estatística dos resultados, empregou-se a análise de variância a 5 % de significância e, sendo significativa, empregou-se o teste de Tukey ao mesmo nível de significância para a comparação das médias.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

No final do período de alagamento, o Planossolo e o Gleissolo apresentaram 280 e 118 mg L⁻¹ de Fe²⁺ na solução, respectivamente. Seis horas após a substituição da solução nutritiva pelas soluções dos solos inundados, as raízes apresentavam-se avermelhadas, principalmente nas plantas que haviam recebido a solução do Planossolo. Após 24 h, a coloração das raízes foi ainda mais intensa e com aspecto laranja-escuro a marrom-escuro, nos tratamentos com 280 mg L⁻¹, e vermelho forte, nos tratamentos com 118 mg L⁻¹, indicando a grande deposição de compostos oxidados. Visualmente, não foi possível diferenciar os cultivares em relação à intensidade de coloração das raízes promovida pelo acúmulo de óxido, porém foi nítida a diferença visual entre os dois níveis de Fe²⁺ na solução.

No presente estudo, a capacidade oxidativa das plantas foi estimada a partir da determinação da quantidade de óxidos de Fe que precipitaram sobre a superfície das raízes. Dentre os compostos de Fe, a lepidocrocita e a goetita já foram identificadas em trabalhos anteriores (Bacha & Hosner, 1977; Chen et al., 1980).

Desconsiderando o que foi absorvido pelas plantas, aproximadamente 18 % da quantidade total do elemento contido nos recipientes de cultivo precipitou sobre a superfície das raízes, independentemente da concentração de Fe²⁺ na solução e do cultivar avaliado. A quantidade de óxido de Fe que precipitou sobre a superfície das raízes não foi significativamente diferente entre os cultivares, quando foram considerados o comprimento, a área ou a massa de raízes (Quadro 3).

Desta forma, a maior tolerância à toxidez de Fe, atribuída ao cultivar EPAGRI 108, não se deve à sua maior capacidade de oxidação em relação ao cultivar BR IRGA 409, considerado sensível. Tais resultados

Quadro 2. Características das soluções de solo utilizadas no experimento (após 180 dias de inundação do solo)

Solução do solo	Fe	Mn	pH	Eh
	— mg L ⁻¹ —			mV
Gleissolo	118	3,3	6,03	-94
Planossolo	280	24,0	6,53	-163

Quadro 3. Quantidade de ferro precipitado sobre as raízes de dois cultivares de arroz, sensível e tolerante à toxidez de ferro, quando se consideraram o comprimento, a superfície e a massa de raízes, após 24 h em contato com a solução de dois solos inundados (Média de três repetições)

Cultivar	GL ⁽¹⁾	PL	Média	GL	PL	Média	GL	PL	Média
	— Fe (mg m ⁻¹ de raiz) —			— Fe (mg m ⁻² de raiz) —			— Fe (mg kg ⁻¹ de raiz) —		
BR IRGA 409 - S ⁽²⁾	0,98	1,97	1,48 A	13,0	28,3	20,6 A	23,0	54,8	38,9 A
EPAGRI 108 - T	1,15	2,22	1,69 A	13,5	29,5	21,5 A	21,8	48,1	35,0 A
Média	1,06 ⁽³⁾ b	2,10 a		13,2 b	28,9 a		22,4 b	51,4 a	

⁽¹⁾ GL = Gleissolo Lâmico; PL = Planossolo Hidromórfico; Sol. N. = Solução Nutritiva. ⁽²⁾ S = sensível; T = tolerante. ⁽³⁾ médias dos solos seguidas por letras minúsculas diferentes, na linha, diferem significativamente entre si (Tukey, P < 0,05); médias de cultivares seguidas por letras maiúsculas iguais, na coluna, não diferem significativamente (Tukey, P < 0,05).

diferem dos obtidos por Chen et al. (1980), os quais observaram diferenças significativas entre os cultivares de arroz em relação à sua capacidade de oxidar o Fe sobre as raízes, bem como de liberar oxigênio pelas raízes.

Os diferentes resultados obtidos nos experimentos podem estar relacionados com os diferentes métodos adotados. Chen et al. (1980) utilizaram amostras de raízes de plantas coletadas em campo e em vários estádios de desenvolvimento da cultura, desde a emergência até à maturidade. No presente experimento, as plantas foram avaliadas num único estádio de desenvolvimento (30 dias após a emergência) e as raízes expostas às soluções por apenas 24 h.

No quadro 4, estão apresentados os resultados de comprimento, área superficial e massa de raízes dos cultivares, nas diferentes soluções de solo. Tais variáveis não foram significativamente diferentes entre os cultivares. Vahl et al. (1993), após terem cultivado plantas de arroz durante 34 dias em solução nutritiva completa e mais um dia em soluções que continham alta concentração de Fe e ou baixa de Ca + Mg, também não observaram diferença entre os cultivares BR IRGA 409, sensível à toxidez de Fe, e a EEA 406, tolerante, em relação a estas mesmas variáveis de desenvolvimento radicular.

Em ambos os experimentos, acredita-se que a exposição das raízes às soluções dos solos inundados por apenas um dia não tenha sido suficiente para que os cultivares pudessem expressar diferenças no desenvolvimento do sistema radicular provocado por diferentes níveis de Fe²⁺ das soluções. Diferenças significativas somente ocorreram entre as soluções: as variáveis de desenvolvimento radicular foram maiores quando as raízes foram expostas à solução nutritiva, indicando que as soluções dos solos inundados podem ter ocasionado algum estresse às raízes.

No quadro 5, encontram-se os resultados das quantidades de Ca, Mg, Mn e P removidas da superfície das raízes, após 24 h na solução dos solos reduzidos. A exemplo do que ocorreu com o Fe, a quantidade de Mn precipitada sobre as raízes não foi significativamente diferente entre os cultivares, indicando novamente que, no estágio de desenvolvimento em que as plantas foram avaliadas, o cultivar BR IRGA 409, sensível à toxidez de Fe, apresentou a mesma capacidade de oxidação do que o EPAGRI 108, considerado tolerante.

Em relação ao Ca e ao Mg, não se percebeu diferença significativa entre os cultivares e entre as soluções de solo, quanto às quantidades destes nutrientes que precipitaram sobre as raízes.

No entanto, para o P, tal precipitação foi superior não só no cultivar BR IRGA 409 em relação ao cultivar EPAGRI 108, mas também quando as raízes foram expostas à solução do Planossolo. O maior acúmulo de P observado na solução mais concentrada em Fe²⁺ pode ser atribuído à maior quantidade de óxidos de Fe acumulada nas raízes, quando nesta solução (Quadro 3), considerando a alta capacidade de adsorção ânions, como o íon fosfato (Schwertmann & Taylor, 1989).

Resultados semelhantes foram obtidos por Zhang et al. (1999), os quais observaram um incremento de 0,2 para 24,5 mg L⁻¹ de P na superfície das raízes das plantas de arroz, quando a concentração de Fe²⁺ na solução aumentou de 0 para 30 mg L⁻¹. Possivelmente, a diferença existente entre os cultivares, quanto à quantidade de P que precipitou sobre as raízes, não está relacionada com a quantidade de óxidos de Fe nas raízes, uma vez que se mostrou semelhante entre os cultivares (Quadro 3).

Com base nos dados obtidos, não foi possível estabelecer uma relação clara entre a adsorção do P e a ocorrência de toxidez de Fe; todavia, esses dados indicam que a adsorção deve favorecer a ocorrência do distúrbio, uma vez que foi superior no cultivar BR IRGA 409, mais sensível à toxidez de Fe. É possível

Quadro 4. Comprimento, superfície e massa de raízes de dois cultivares de arroz, sensível e tolerante à toxidez de ferro, após 30 dias de cultivo em solução nutritiva completa e mais um dia na solução de dois solos reduzidos (Médias de três repetições)

Cultivar	Comprimento da raiz				Superfície da raiz				Massa da raiz			
	GL ⁽¹⁾	PL	Sol. N.	Média	GL	PL	Sol. N.	Média	GL	PL	Sol. N.	Média
	(m por recipiente)				(cm ² por recipiente)				(g por recipiente)			
BR IRGA 409 - S ⁽²⁾	155	208	251	204,7 A	1.143	1.424	1.575	1.381 A	0,64	0,73	0,81	0,73 A
EPAGRI 108 - T	136	165	241	180,7 A	1.156	1.246	1.496	1.299 A	0,72	0,77	0,87	0,79 A
Média	145,5 ⁽³⁾ b	186,5 b	246,0 a		1.150 b	1.335 ab	1.536 a		0,68 b	0,75 ab	0,84 a	

⁽¹⁾ GL = Gleissolo Lâmico; PL = Planossolo Hidromórfico; Sol. N. = Solução Nutritiva. ⁽²⁾ S= sensível; T= tolerante. ⁽³⁾ médias dos solos seguidas por letras minúsculas diferentes, na linha, diferem significativamente entre si (Tukey, P < 0,05); médias de cultivares seguidas por letras maiúsculas iguais, na coluna, não diferem significativamente (Tukey, P < 0,05).

Quadro 5. Quantidades de manganês, cálcio, magnésio e fósforo retidas na superfície das raízes de cultivares de arroz, sensível e tolerante à toxidez de ferro, após 24 h de contato com solução de dois solos inundados (Médias de três repetições)

Cultivar	Ca				Mg				Mn			P			
	GL ⁽¹⁾	PL	Sol. N.	Média	GL	PL	Sol. N.	Média	GL	PL	Média	GL	PL	Sol. N.	Média
	mg por recipiente														
BR IRGA 409 - S ⁽²⁾	2,03	2,04	2,01	2,03 A	2,12	2,56	2,49	2,39 A	0,096	0,750	0,423 A	2,77	4,34	2,60	3,28 A
EPAGRI 108 - T	1,79	1,68	2,17	1,88 A	2,12	2,23	2,61	2,32 A	0,104	0,810	0,457 A	2,44	3,43	2,33	2,73 B
Média	1,91 ⁽³⁾ a	1,86 a	2,09 a		2,12 a	2,40 a	2,55 a		0,100 b	0,780 a		2,61 b	3,89 a	2,46 b	

⁽¹⁾ GL = Gleissolo Lâmico; PL = Planossolo Hidromórfico; Sol. N. = Solução Nutritiva. ⁽²⁾ S= sensível; T= tolerante. ⁽³⁾ médias dos solos seguidas por letras minúsculas diferentes, na linha, diferem significativamente entre si (Tukey, P < 0,05); médias de cultivares seguidas por letras maiúsculas iguais, na coluna, não diferem significativamente (Tukey, P < 0,05).

que a menor adsorção observada para o EPAGRI 108 esteja relacionada com a maior capacidade de esse cultivar liberar pelas raízes produtos que tornam os compostos de Fe menos ativos para a adsorção e, conseqüentemente, o P mais disponível para a planta.

No quadro 6, estão apresentados os teores de nutrientes no tecido das raízes. Observou-se maior concentração de P nas raízes, quando elas foram expostas à solução do Planossolo, fato atribuído à maior retenção de P pela camada de óxidos, quando nesta solução (Quadro 4), o que favoreceu a difusão do nutriente até o interior das raízes (Zangh et al.,

1999). As concentrações de Ca e Mg no tecido das raízes foram inferiores às reportadas por Vahl (1991), pois parte destes nutrientes migrou para o HCl 0,5 mol L⁻¹, quando as raízes foram colocadas nesta solução, a exemplo do que ocorreu com a maior parte do K (dados não mostrados). A concentração de Fe nas raízes também foi superior na solução do Planossolo (Quadro 6), indicando que o aumento de Fe²⁺ na solução, além de aumentar a quantidade de óxidos sobre as raízes, favoreceu a absorção do elemento e, conseqüentemente, o aumento de sua concentração na parte aérea das plantas (Quadro 7).

Quadro 6. Quantidades de cálcio, magnésio, fósforo e ferro no tecido das raízes de dois cultivares de arroz, sensível e tolerante à toxidez de ferro, após 24 h de contato com solução de dois solos inundados (Médias de três repetições)

Cultivar	Ca				Mg				P				Fe			
	GL ⁽¹⁾	PL	Sol. N.	Média	GL	PL	Sol. N.	Média	GL	PL	Sol. N.	Média	GL	PL	Sol. N.	Média
mg kg ⁻¹																
BR IRGA 409 - S ⁽²⁾	117	104	111	111 A	79	103	108	97 A	571	732	404	569 A	384	625	131	380 A
EPAGRI 108 - T	124	115	117	119 A	132	99	98	110 A	652	713	370	578 A	391	598	121	370 A
Média	121 a ⁽³⁾	110 a	114 a		106 a	101 a	103 a		612 b	723 a	387 c		388 b	612 a	126 c	

⁽¹⁾ GL = Gleissolo Lâmico; PL = Planossolo Hidromórfico; Sol. N. = Solução Nutritiva. ⁽²⁾ S = sensível; T = tolerante. ⁽³⁾ médias dos solos seguidas por letras minúsculas diferentes, na linha, diferem significativamente entre si (Tukey, P < 0,05); médias de cultivares seguidas por letras maiúsculas iguais, na coluna, não diferem significativamente (Tukey, P < 0,05).

Quadro 7. Quantidades de cálcio, magnésio, fósforo, potássio e ferro na parte aérea de dois cultivares de arroz, sensível e tolerante à toxidez de ferro, após 24 h de contato com solução de dois solos inundados (Médias de três repetições)

Cultivar	Ca				Mg				P				K				Fe			
	GL ⁽¹⁾	PL	Sol. N.	Média	GL	PL	Sol. N.	Média	GL	PL	Sol. N.	Média	GL	PL	Sol. N.	Média	GL	PL	Sol. N.	Média
%																				
mg kg ⁻¹																				
BR IRGA 409-S ⁽²⁾	0,21	0,21	0,21	0,21 A	0,32	0,32	0,33	0,32 A	0,44	0,42	0,42	0,42 A	2,7	3,3	2,9	3,0 A	244	297	159	233 A
EPAGRI 108 - T	0,18	0,21	0,19	0,19 A	0,28	0,28	0,27	0,28 B	0,44	0,42	0,44	0,44 A	2,6	2,6	2,6	2,6 A	228	322	184	245 A
Média	0,19 ⁽³⁾ a	0,21a	0,20 a		0,30 a	0,30 a	0,30 a		0,44 a	0,42 a	0,44 a		2,7 a	3,0 a	2,8 a		236 b	310 a	172 b	

GL = Gleissolo Lâmico; PL = Planossolo Hidromórfico; Sol. N. = Solução Nutritiva. ⁽²⁾ S = sensível; T = tolerante. ⁽³⁾ médias dos solos seguidas por letras minúsculas diferentes, na linha, diferem significativamente entre si (Tukey, P < 0,05); médias de cultivares seguidas por letras maiúsculas iguais, na coluna, não diferem significativamente (Tukey, P < 0,05).

CONCLUSÃO

1. Os cultivares BR IRGA 409 e EPAGRI 108 apresentaram a mesma capacidade de oxidar o Fe sobre a superfície de suas raízes, não sendo, portanto, a capacidade de oxidação a variável que diferenciou estes cultivares em termos de sensibilidade à toxidez de Fe.

2. A solução do Planossolo, por ser mais concentrada em Fe²⁺, permitiu maior acúmulo de óxidos sobre as raízes das plantas de arroz.

3. A camada de óxidos sobre as raízes do cultivar EPAGRI 108, tolerante à toxidez de Fe, foi menos ativa em adsorver P do que a do cultivar BR IRGA 409, considerado sensível.

LITERATURA CITADA

ARMSTRONG, W. Rhizosphere oxidation in rice: An analysis of intervarietal differences in oxygen flux from the roots. *Physiol. Plant.*, 22:296-303, 1969.

- BACHA, R.E. & HOSSNER, L.R. Characteristics of coatings formed on rice roots as affected by iron and manganese additions. *Soil. Sci. Soc. Am. J.*, 44:931-935, 1977.
- CHEN, C.C.; DIXON, J.B. & TURNER, F.T. Iron coatings on rice roots: Mineralogy and quantity influencing factors. *Soil. Sci. Soc. Am. J.*, 44:635-639, 1980.
- GREWELING, T. Chemical analysis of plant tissue. Ithaca, Cornell University Agricultural Experiment Station, 1976. 35p. (Agronomy, 6)
- HOWELLER, R.H. Iron-induced orange disease of rice in relation to physico-chemical changes in a flooded soil. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 37:898-903, 1973.
- PONNANPERUMA, F.N. The chemistry of submerged soils. *Adv. Agron.*, 24:29-96, 1972.
- STONE, L.F. Apresentação. In: REUNIÃO SOBRE FERRO EM SOLOS INUNDADOS, Goiânia, 1987. Anais. Goiânia, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 1988. p.1.
- SCHWERTMANN, U. & TAYLOR R.M. Iron Oxides. In: DIXON, J.B. Minerals in soil environment. 2.ed. Madison, 1989 (SSSA Book Series, 1)
- TENNANT, A. A test of modified line intersect method of estimating root length. *J. Appl. Ecol.*, 12:995-1001, 1975.
- VAHL, L.C. Toxidez de ferro em genótipos de arroz irrigado por alagamento. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1991. 167p. (Tese de Doutorado)
- VAHL, L.C.; ANGHINONI, I. & VOLKWEISS, S.J. Cinética de absorção de potássio afetada por ferro, cálcio e magnésio em genótipos de arroz de diferentes sensibilidades à toxidez de ferro. *R. Bras. Ci. Solo*, 17:269-273, 1993.
- YOSHIDA, S. Fundamentals of rice crop science. Los Banos, International Rice Research Institute, 1981. 269p.
- ZHANG, X.; ZHANG, F. & MAO, D. Effect of iron plaque outside roots on nutrient uptake by rice (*Oryza sativa* L.): Phosphorus uptake. *Plant Soil*, 209:187-192, 1999.