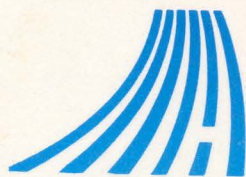


PROVÁRZEAS NACIONAL



MINISTÉRIO DA AGRICULTURA



EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA
VINCULADA AO MINISTÉRIO DA AGRICULTURA

CENTRO NACIONAL DE PESQUISA DE ARROZ E FEIJÃO – CNPAF



ANAIS da I Reunião sobre **FERRO** em Solos Inundados

CNPAP - Goiânia GO. / 19 a 21 de maio - 1987

Introdução

Até a década de sessenta, as desordens nutricionais causadas por alguns micronutrientes e que ainda ocorrem com frequência em arroz irrigado, eram denominadas simplesmente de "doenças fisiológicas", porque os pesquisadores desconheciam as causas desses problemas. Somente depois de observarem que a eliminação do ar do solo pela água de irrigação estava relacionada a certos compostos reduzidos no solo, tais desordens nutricionais passaram a ser melhor entendidas, sendo, então, atribuídas a altas concentrações de íons solúveis de Fe e Mn e a certos produtos da respiração anaeróbica, como ácidos orgânicos e H_2S .

Quando um campo de arroz é inundado, o equilíbrio químico e biológico do solo é bastante alterado, e após um certo período mantido em submersão, um novo equilíbrio é alcançado. Observa-se, a princípio, um grande consumo de oxigênio pelos microorganismos e uma queda do potencial redox, atingindo, geralmente, valores abaixo de 0,2V a pH 7, quando então o Fe^{+++} reduz-se a Fe^{++} (Ponnamperuma 1975).

Nas condições de solos submersos, o comportamento do C, N, S, Fe e Mn geralmente segue como mostrado na Tabela 1. Quando o arroz é drenado antes da colheita, os potenciais redox aumentam, as concentrações de Fe^{++} e Mn^{++} diminuem e o N, S e C oxidam. Quando o solo é inundado novamente, as reações se revertem.

Depois que os microorganismos utilizam o O_2 e NO_3^- dissolvidos na solução do solo, passam a utilizar como fonte de elétrons, os compostos de Fe^{+++} , Mn^{+++} e Mn^{++++} . O Fe^{++} solúvel é necessário ao bom desenvolvimento do arroz, porém em solos ácidos sua concentração pode atingir um nível tóxico para o arroz. Em geral a concentração de Fe^{++} na solução do solo é baixa, e raramente ultrapassa 0,1 ppm. Mas como as quantidades de Fe^{++} na fase sólida do solo são geralmente grandes, a concentração na solução do solo pode alcançar a faixa de centenas de ppm, provocando toxicidade às plantas. Este efeito nocivo é ainda maior quando o solo possui altos teores de matéria orgânica.

Em um solo bem drenado os principais produtos formados pela decomposição da matéria orgânica são: CO_2 , NO_3^- , SO_4^{--} e húmus; em solos submersos, os principais são: CO_2 , H^+ , CH_4 , NH_3 , ácidos orgânicos, H_2S e outros resíduos parcialmente humificados. Portanto, a diferença mais drástica entre a decomposição anaeróbica e aeróbica da matéria orgânica está na natureza dos produtos finais.

A dinâmica de transformação do Fe^{++} segue uma curva aproximadamente assintótica. A concentração de Fe^{++} na solução do solo aumenta com o tempo de submersão, alcança um máximo e depois cai até atingir um nível de estabilização, que persiste por vários meses (Fig. 1). O comportamento dessa curva que descreve a taxa de formação de Fe solúvel em água depende do pH, do teor de matéria orgânica do solo, da temperatura, da natureza e teor de óxidos de ferro e do grau de cristalinidade dos óxidos.

Quanto mais baixo for o grau de cristalinidade, maior será a percentagem de redução. Dependendo desses fatores, 5 a 50% dos óxidos de ferro livre presente no solo pode ser reduzido dentro de poucas semanas de submersão (Ponnamperuma 1972).

A redução dos óxidos hidratados de Fe^{+++} tem importantes consequências químicas: (a) a concentração de Fe solúvel em água aumenta; (b) há um aumento de pH; (c) cátions são deslocados dos sítios de troca pelo Fe e Mn; (d) aumenta a solubilidade do P e da sílica; e (e) novos minerais são formados. Tais reações de redução tem influência sobre as propriedades químicas do solo, o que altera a disponibilidade de nutrientes para as plantas.

Parâmetros relacionados com a fertilidade de solos submersos

Duas características ou processos físico-químicos, entre outros, que controlam a fertilidade em solos submersos são o pH e o potencial redox (Eh).

O efeito total da submersão é aumentar o pH de solos ácidos e diminuir o pH de solos sódicos e calcários. Assim, a submersão converge os valores de pH de solos ácidos (exceto aqueles baixos em ferro) e solos alcalinos para valores em torno de 6,0 a 6,5 (Fig. 2). O valor de pH influencia profundamente o equilíbrio de hidróxidos, carbonatos, sulfatos, fosfatos e silicatos em solos submersos. Este equilíbrio regula a precipitação e dissolução de sólidos, adsorção e a concentração de íons (Ponnamperuma 1972). Por exemplo, o aumento em pH de solos ácidos beneficia o arroz irrigado por submersão contínua porque elimina a toxidez de Al, e aumenta a disponibilidade de P e de outros nutrientes (Moraes &

Freire 1974).

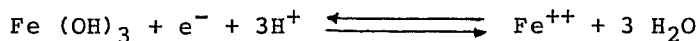
O potencial redox (Eh), é talvez a característica físico-química mais importante que controla as características químicas e bioquímicas dos solos inundados (Ponnamperuma 1977). Eh ou o pE (logaritmo na base 10 da atividade elétrica, igual a $eH/0,0592$), mede a intensidade de oxidação ou redução. Valores positivos e altos de Eh e pE indicam condições de oxidação e negativos e baixos indicam condições de redução (Tabela 1 e Fig. 3).

A variação do Eh tem sido importante nos solos submetidos à inundação contínua. As vantagens dessa variação do Eh são aumento no suprimento de N, P, K, Fe, Mn e Mo e diminuição dos efeitos tóxicos de Mn e Al. As desvantagens são as perdas de N pela desnitrificação, diminuição da disponibilidade de SO_4^{2-} , Cu e Zn, e produção de substâncias tóxicas ou que interferem na absorção de nutrientes pelas plantas.

Durante o tempo em que o arroz permanece nas condições aeróbicas, acredita-se que o P precipita nas formas de fosfatos de Fe e Al. Nas condições subsequentes de inundação, os fosfatos de Fe e Al são reduzidos a fosfatos de Fe e Al mais solúveis. Esta redução pode acontecer mesmo em solos com alta disponibilidade de P. Pode acontecer, portanto, que em solos aeróbicos de várzeas, aparentemente ricos em P, tenha baixa capacidade de suprimento de P às plantas, devido o fosfato de Fe estar na forma insolúvel.

Como em solos anaeróbicos o processo de redução é favorecido, o Fe^{+++} passa para Fe^{++} e o equilíbrio da reação

abaixo é desfavorável ao $\text{Fe}(\text{OH})_3$, ao contrário do que ocorre em solos bem arejados.



Desta reação de redução e também de outras que ocorrem no solo, é evidente que envolve o consumo de H^+ . Isto significa um aumento na concentração de OH^- e conseqüentemente do pH.

Em solos submetidos a condições anaeróbicas a taxa de atividade de $\text{Fe}^{+++}/\text{Fe}^{++}$ pode ser um importante parâmetro em relação a toxicidade de Fe em arroz irrigado. De acordo com Mengel & Kirkby (1978), este parâmetro pode ser avaliado através do potencial redox, seguindo a equação de Nernst simplificada:

$$E = 0,77 + 0,059 \log. \frac{[\text{Fe}^{+++}]}{[\text{Fe}^{++}]}$$

Os valores de potencial redox variam ao longo do perfil. Em camadas mais profundas do solo, que são menos arejadas, a fração de Fe^{++} em relação ao total é mais alta do que nos horizontes superficiais. Dessa forma, espera-se valores menores de potencial redox nas camadas mais profundas.

O nível tóxico de Fe na planta de arroz é bastante amplo e, varia de 50 a 1.680 ppm (De & Mandal 1957, Ishizuka 1961), dependendo do solo, cultivar, critério usado para avaliação da toxicidade, estágio de desenvolvimento da planta e de fatores climáticos como temperatura e radiação solar. Segundo Ottow et al. (1982) a toxicidade de Fe pode estar diretamente relacionada com a absorção excessiva desse elemento pela planta, o que lhe danifica as células (toxicidade direta), ou, indiretamente,

inibindo a absorção de outros nutrientes (toxicidade indireta).

A capacidade de oxidação da raiz do arroz é considerada uma adaptação fisiológica importante que permite seu crescimento em condições de solo reduzido, porque causa a precipitação de Fe da rizosfera e, conseqüentemente, reduz a absorção de Fe e de outros elementos encontrados em quantidades tóxicas no solo (Tadano 1975, Jayawardena et al. 1977). A zona oxidada que se desenvolve na rizosfera do arroz funciona, dessa forma, como um meio de proteção contra elementos tóxicos tais como Fe^{++} , Mn^{++} e sulfetos (Fig. 4).

Tanaka et al. (1966) encontraram grandes quantidades de Fe depositados na superfície e na epiderme das raízes do arroz, sem, no entanto, determinar a natureza química e mineralógica desta camada de óxido de ferro que se formou nas raízes. Este estudo foi realizado por Bacha & Hossner (1977) e concluíram que pela ocorrência sistemática de um pico na análise de difração de Raios-X a $6,26 \text{ \AA}$, tratava-se de lipidocrocita ($\alpha - FeOOH$).

Sintomas

Inicialmente, os sintomas consistem de uma descoloração das folhas que pode variar de laranja pálido a alaranjado escuro. As vezes, quando a toxicidade é intensa, as folhas velhas mostram manchas de coloração parda e em seguida uma coloração parda arroxeada e, finalmente, secam e morrem. Nota-se, também, um atrofiamento das plantas e um número reduzido de perfilhos. As raízes são poucas, curtas e grossas, geralmente cobertas por uma

camada de óxido de ferro.

Segundo Ponnampuruma (1975), estes sintomas aparecem quando a concentração de Fe^{++} na solução do solo excede a 350 ppm. Os sintomas podem variar de acordo com a cultivar e o nível de fertilidade do solo, principalmente quanto ao teor de K, P e o nível de saturação de bases.

Em síntese, os sintomas de toxicidade de Fe^{++} consistem de: (a) crescimento e desenvolvimento reduzido; (b) baixo perfilhamento; (c) folhas amareladas; (d) secamento total das folhas em concentrações muito altas de Fe^{++} ; (e) raízes curtas, grossas e pouco ramificadas; e (f) raízes de coloração avermelhada.

Controle da disponibilidade de Fe^{++} em solos submersos

Atualmente, admite-se que a toxicidade de Fe^{++} é um dos fatores limitantes do rendimento do arroz irrigado no Brasil. Este problema tem sido encontrado nos estados do RS, SC, RJ, ES, MG e, em menor intensidade, no Estado de Goiás. Em solos que apresentam toxicidade de Fe^{++} revelam concentrações que podem alcançar 400 a 600 ppm de Fe^{++} na solução do solo após 2 a 3 semanas de submersão (Fig. 1). De acordo com Ponnampuruma (1975), as plantas cultivadas nestes solos mostram mais de 800 ppm de Fe na palha em comparação com 150 ppm em plantas normais.

Entre os métodos recomendados para diminuir o problema da toxicidade de Fe^{++} podem ser citados: a calagem, drenagem, pré-submersão, submersão no final do período de crescimento, drenagem do solo no meio do ciclo da cultura (Howeler 1973), aplicação de

MnO₂ e eliminação da matéria orgânica. Destas práticas, somente a drenagem e a calagem tem mostrado bons resultados a nível de campo (Fig. 5 e Tabelas 2 e 3). Em muitos casos, a calagem pode não ser viável economicamente. Neste caso, é recomendado o plantio de cultivares tolerantes ou resistentes a toxicidade de Fe⁺⁺ (Tabela 4).

Conclusões e Recomendações

A toxicidade de Fe⁺⁺ em lavouras de arroz irrigado foi constatada em vários estados brasileiros. Quando um solo é submerso, o equilíbrio químico e biológico desse solo é alterado. a redução do Fe⁺⁺⁺ e o conseqüente aumento de sua disponibilidade é a mais importante alteração química que ocorre quando um solo é submetido a submersão contínua.

As principais características de um solo de arroz irrigado por submersão contínua são:

1. Deficiência de O₂ e excesso de CO₂
2. Decomposição anaeróbica da matéria orgânica
3. Presença de Fe⁺⁺ e Mn⁺⁺
4. Aumento da disponibilidade de P, K⁺, Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, Na⁺, NH₄⁺, HCO₃⁻ e Si(OH)₄
5. Aumento de pH
6. Diminuição do potencial redox
7. Presença de substâncias tóxicas, como H₂S

Dentre os fatores do solo e ambiente associados com a toxicidade de Fe⁺⁺ em arroz irrigado, podem ser citados, entre

outros, o pH, teor de matéria orgânica, natureza e teor de óxidos de ferro e temperatura.

No Brasil, a toxicidade de Fe^{++} já foi constatada nas lavouras de arroz irrigado nos estados de Minas Gerais, mais especificamente na Zona da Mata e Cambuquira no Sul de Minas, em Santa Catarina, Rio de Janeiro, Espírito Santo, no Projeto Jari no Pará, Rio Grande do Sul e, em menor intensidade, no Estado de Goiás. Com o incentivo que o Governo pretende dar aos cultivos irrigados e à utilização de várzeas, através do PROVARZEAS, faz-se necessário entender as razões principais da toxicidade de Fe^{++} e buscar soluções para o problema.

Diferenças em sistemas de rotação e práticas de manejo d'água empregadas afetam grandemente as características do solo, tais como pH e teor de matéria orgânica, as quais constituem fatores importantes na disponibilidade de nutrientes em solos, inclusive Fe. Há necessidade, portanto, de conhecer para os solos brasileiros, a época em que ocorre a maior concentração de Fe na solução do solo após submersão. Em função disso, a questão da época de transplante, manejo d'água, calagem, gessagem, identificação de cultivares tolerantes e a rotação de culturas, devem ser melhor estudadas, sobre a disponibilidade de Fe, Mn, Cu e Zn. Para isto, é preciso estabelecer um programa coordenado de pesquisa, devido a grande diversidade de condições que existem em várias regiões.

LITERATURA CONSULTADA

- BACHA, R.E. & HOSSNER, L.R. Characteristics of coatings formed on rice roots as affected by iron and manganese additions. Soil Sci. Soc. Amer. J., 41(5):931-5, 1977.
- BARBOSA FILHO, M.P.; FAGERIA, N.K.; STONE, L.F. Manejo d'água e calagem em relação a produtividade e toxicidade de ferro em arroz. Pesq. Agropec. Bras., 18(8):903-10, 1983.
- BOHN, H.; McNEAL, B.; O'CONNOR, G. Soil chemistry. New York, John Wiley, 1979. 329p.
- DE, P.D. & MANDAL, L.N. Physiological diseases of rice. Soil Sci., 84:367-76, 1957.
- FAGERIA, N.K.; BARBOSA FILHO, M.P.; CARVALHO, J.R.P.; RANGEL, P.H.N.; CUTRIM, V.A. Avaliação preliminar de cultivares de arroz para tolerância à toxidez de ferro. Pesq. Agropec. Bras., 19(10):1271-8, 1984.
- FREIRE, F.M.; NOVAIS, R.F.; SOARES, P.C.; COSTA, L.M.; FARIA, E.A. Calagem, adubação orgânica e manejo da água no controle da toxicidade de ferro em arroz irrigado. R. Ceres, 32(180):162-9, 1985.

HOWELER, R.H. Iron induced orangging disease of rice in relation to physiochemical changes in a flooded oxisol. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 37:898-903, 1973.

ISHIZUKA, Y. Effect of iron, manganese and copper level in culture solution on yields and chemical composition of the plant. J. Sci. Soil Manure, Japan, 32:97-100, 1961.

JAYAWARDENA, S.D.G.; WATAGE, T.; TANAKA, K. Relation between oxidizing power and resistance to iron toxicity in rice. Rept. Soc. Crop Sci., Breeding. Kinki, Japan, 22:35-47, 1977.

MENGEL, K. & KIRKBY, E.A. Principles of plant nutrition. Berne, Intern. Potash Inst. 1978. 593p.

MORAES, J.F.V. El uso de la resina de intercambio anionico (amberlita IRA-400) para avaluar el fosforo em suelos inundados. Chapingo, Colegio de Postgraduados, 1971. 78p. Tese Mestrado.

MORAES, J.F.V. & FREIRE, C.J.S. Variação do pH, da condutividade elétrica e da disponibilidade dos nutrientes nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio e magnésio em quatro solos submetidos a inundação. Pesq. Agropec. Bras., Série Agron., 9:35-43, 1974.

- OTTOW, J.C.G.; BENCKISER, G.; WATANABE, I.; SANTIAGO, S.
Multiple nutritional soil stress as the prerequisite for iron toxicity of wetland rice (*Oryza sativa* L.). *Trop. Agri., Trinidad*, 60(2):102-6, 1982.
- PONNAMPERUMA, F.N. The chemistry of submerged soils. *Adv. Agron.*, 24:29-96, 1972.
- PONNAMPERUMA, F.N. Limitaciones de microelementos en suelos acidos arroceros tropicales. In: BORNEMISZA, E. & ARVARADO, A. ed. *Manejo de suelos en la America Tropical*. Raleigh, NCSU, 1975. p.336-54.
- PONNAMPERUMA, F.N. *Physico-chemical properties of submerged soils in relation to fertility*. Los Baños, IRRI, 1977. 32p. (IRRI Research paper series, 5).
- TADANO, T. Divices of rice roots to tolerate high iron concentration in growth media. *JARO*, 9:34-9, 1975.
- TANAKA, A.; LOE, R.; NAVASERO, S.A. Some mechanisms involved in the development of iron toxicity syptoms in the rice plant. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 12:158-64, 1966.

Tabela 1. Ordem de utilização de elétrons dos principais aceptores no solo, potencial de equilíbrio das meias reações a pH 7 e potencial redox dessas reações no solo.

	Eh a pH 7 (V)	Potencial redox (V)
Desaparecimento de O ₂		
$O_2 + 2e^- + 2H^+ = H_2O$	0,82	0,6 a 0,4
Desaparecimento do NO ₃ ⁻		
$NO_3^- + 2e^- + 2H^+ = NO_2^- + H_2O$	0,54	0,5 a 0,2
Formação de Mn ⁺⁺		
$MnO_2 + 2e^- + 4H^+ = Mn^{++} + 2H_2O$	0,4	0,4 a 0,2
Formação de Fe ⁺⁺		
$FeOOH + e^- + 3H^+ = Fe^{++} + 2H_2O$	0,17	0,3 a 0,1
Formação de HS ⁻		
$SO_4^{--} + 9H^+ + 6e^- = HS^- + 4H_2O$	-0,16	0,0 a -0,15
Formação de H ₂		
$H^+ + e^- = 1/2 H_2$	-0,41	-0,15 a -0,22
Formação de CH ₄ (exemplo de fermentação)		
$(CH_2O)_n = \frac{n}{2} CO_2 + \frac{n}{2} CH_4$	-	-0,15 a -0,22

Fonte: Bohn et al. (1979).

Tabela 2. Produção de matéria seca da parte aérea, número médio de perfilhos/planta e percentagem de folhas com sintomas de toxicidade de ferro, em relação às práticas de manejo de solo.

Tratamento	Matéria seca da parte aérea (g/vaso)	No. médio perfilhos p/planta	Folhas c/ sintomas (%)
1. Calcário - 4 t/ha	11,97	9,3	0
2. Esterco de curral - 20 t/ha	9,38	8,8	72
3. Palha de arroz - 10 t/ha	6,31	6,7	76
4. Pré-submersão 15 dias antes do transplante	1,61	1,9	75
5. Pré-submersão 30 dias antes do transplante	0,50	1,1	92
6. Submersão durante o transplante e 15 dias depois deste, suspensão da H ₂ O por 7 dias, repetindo-se, em seguida, o manejo de H ₂ O anterior	6,42	8,1	74
7. Submersão durante o transplante com renovação de H ₂ O de 7 em 7 dias	3,95	4,6	75
8. Submersão durante o transplante, mantendo-se a H ₂ O sem renovação durante todo experimento	3,78	4,3	75
9. Idem ao tratamento 8 + termofosfato Yoorim como fonte de P	5,54	5,3	74
DMS (Tukey - 5%)	1,52	1,43	-

FONTE: Freire et al. (1985).

Tabela 3. Relação entre os teores de macro e micronutrientes e teor de Fe, na parte aérea do arroz, em função dos tratamentos em solos coletados em Leopoldina (SL) e em Muriaé (SM), na Zona da Mata de Minas Gerais (Barbosa Filho et al. 1983).

Tratamentos	N/Fe	P/Fe	K/Fe	Ca/Fe	Mg/Fe	Zn/Fe	Cu/Fe	Mn/Fe
----- Solo SL -----								
T1	11,73	0,91	8,60	1,22	1,17	0,0239	0,0020	0,2438
T2	13,24	1,18	11,42	1,62	1,03	0,0290	0,0020	0,2546
T3	17,56	1,06	12,07	1,79	1,61	0,0346	0,0032	0,3757
T4	12,54	0,88	19,84	2,43	2,58	0,1010	0,0147	2,3304
Media	13,77	1,01	12,99	1,77	1,60	0,0471	0,0055	0,8011
----- Solo SM -----								
T1	2,48	0,44	5,52	0,62	0,59	0,0088	0,0006	0,2504
T2	4,47	0,45	6,70	0,63	0,63	0,0108	0,0016	0,1841
T3	3,76	0,48	6,78	0,81	0,74	0,0144	0,0010	0,2747
T4	17,55	1,36	21,62	2,93	2,51	0,1160	0,0188	2,3542
Media	7,06	0,68	10,15	1,24	1,21	0,0375	0,0055	0,7659

T1 = Inundação seis semanas antes do transplântio.

T2 = Inundação e transplântio imediato.

T3 = Inundação duas semanas antes do transplântio + 2 t/ha de calcário.

T4 = Sem inundação, mas úmido e aeróbico.

Solo SL = 420 ppm de Fe; Solo SM = 730 ppm de Fe.

Tabela 4. Classificação de cultivares de arroz para tolerância à toxicidade de ferro baseada na redução da produção da matéria seca da parte aérea.

Cultivar	Concentração de Fe (ppm)					
	10	20	40	60	80	100
BG 90-2	MT	MT	MS	S	S	S
Suvale 1	MS	MS	S	S	S	S
Paga Divida	T	MT	MS	S	S	S
IAC 899	T	T	MS	S	S	S
CICA 8	T	T	S	S	S	S
Bluebelle	T	MT	MT	MS	S	S
IR 36	MT	MS	S	S	S	S
IR 22	T	T	MS	S	S	S
IR 26	MS	MS	S	S	S	S

T = tolerantes; MT = moderadamente tolerantes; MT = moderadamente susceptíveis; e S = susceptíveis.

FONTE: Fageria et al. (1984).

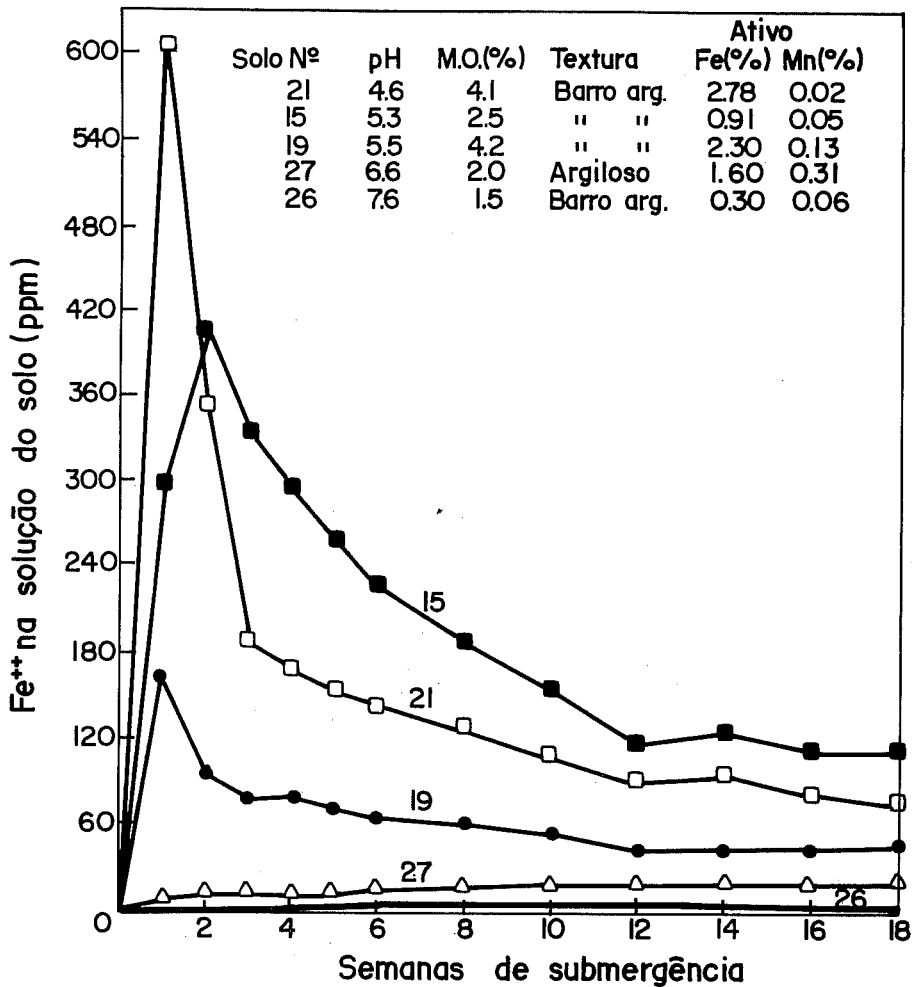


Fig. 1. Dinâmica de Fe²⁺ na solução de 5 solos inundados

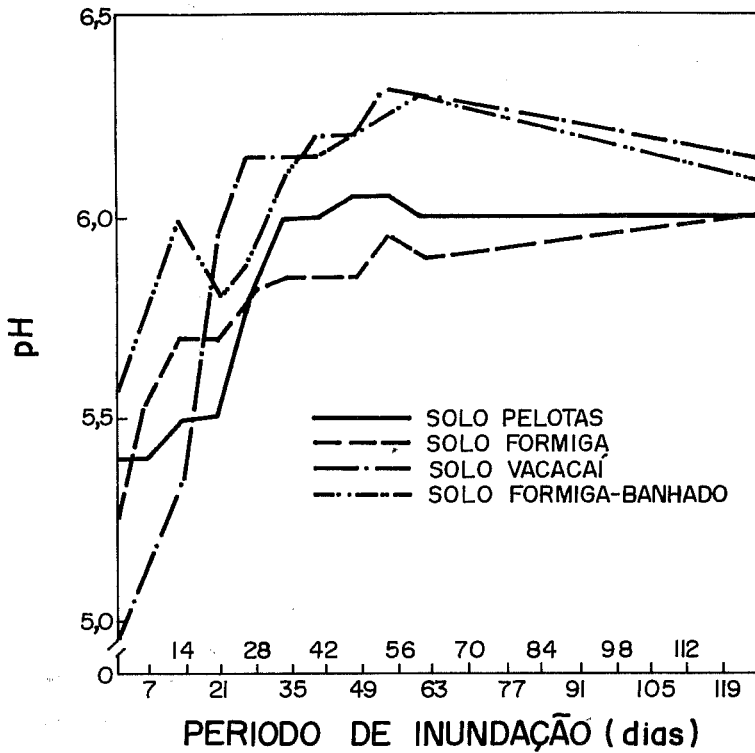


Fig. 2. Variação do pH dos solos durante a inundaçãõ (Moraes & Freire 1974).

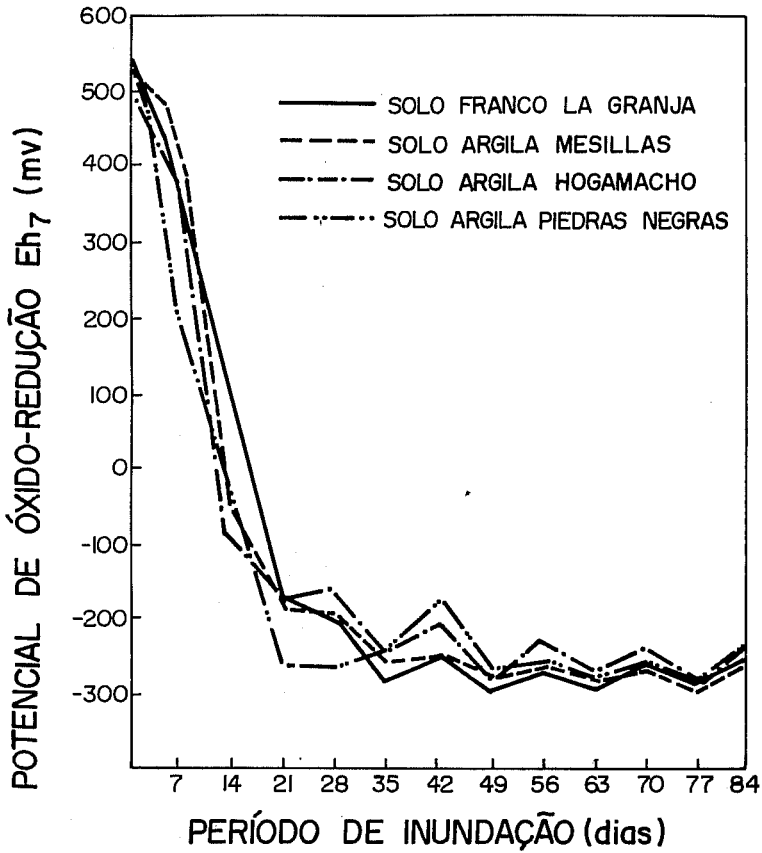


Fig. 3. Variação do potencial de oxidação - redução (Eh) durante o período de inundação (Moraes 1971).

OXIDAÇÃO RIZOSFERA TRANSPORTE O₂ VIA PLANTA

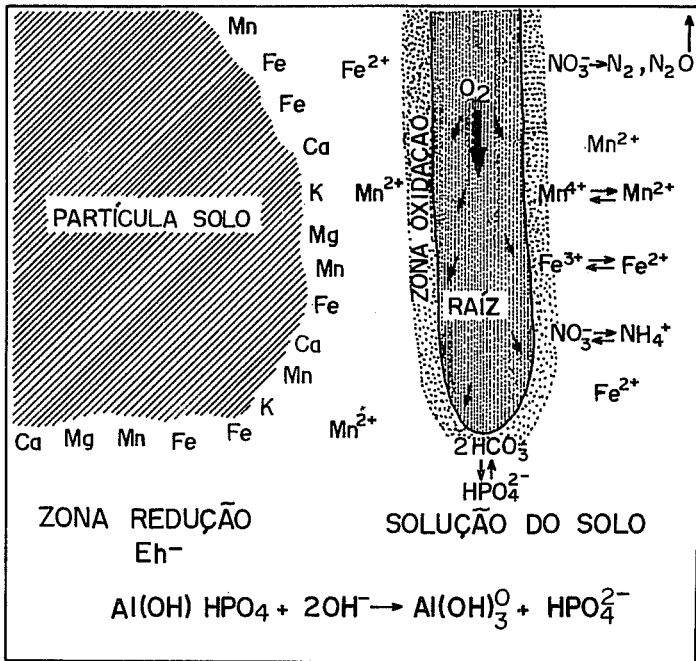
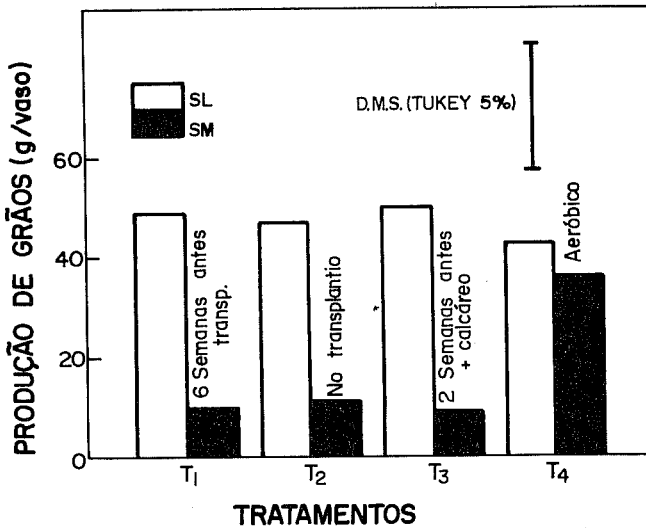


Fig. 4. Representação da rizosfera oxidada do arroz.



- T₁ - Inundação seis semanas antes do transplante
T₂ - Inundação e transplante imediato
T₃ - Inundação duas semanas antes do transplante + 2 t/ha de calcário
T₄ - Sem inundação, mas úmido e aeróbico
SL - Solo de Leopoldina; SM - Solo de Muriaé.

Fig. 5. Influência de diferentes tratamentos sobre a produção de grãos de arroz por vaso, em dois tipos de solos. Barbosa Filho et al. (1983).