

Ministério da Agricultura e Reforma Agrária - MARA



**Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA**

Unidade de Execução de Pesquisa de Âmbito Estadual de Dourados  
UEPAE de Dourados

## I CURSO DE MANEJO DE ÁREAS DE VÁRZEA DO MATO GROSSO DO SUL

Dourados, MS, setembro e outubro de 1992

**ANAIS**

Dourados, MS  
1992

## TRANSFORMAÇÕES QUÍMICAS EM SOLOS INUNDADOS E SUAS INFLUÊNCIAS SOBRE O MANEJO DE FERTILIZANTES

Morel Pereira Barbosa Filho<sup>1</sup>

### 1. INTRODUÇÃO

Quando uma lavoura de arroz irrigado é inundada, observa-se, a princípio, um grande consumo de oxigênio pelos microorganismos. Portanto, o solo deixa de se comportar como um sistema oxidado e passa a um sistema redutor, com um poder de redução que varia com o pH, teor de matéria orgânica e com os teores de óxidos hidratados de ferro e manganês. Para que as raízes possam crescer nessas condições, o arroz desenvolveu um tecido especial de transporte de ar (aerênquima), pelo qual o oxigênio é transportado da parte aérea para as raízes.

Até a década de 60, 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, é que tais desordens nutricionais passa-

<sup>1</sup> Eng.-Agr., Ph.D., EMBRAPA-CNPAP, Caixa Postal 179, 74001-970 - Goiânia, GO.

ram a ser melhor entendidas, sendo então atribuídas a altas concentrações de íons solúveis de ferro e manganês e a certos produtos da respiração anaeróbica, como ácidos orgânicos e  $H_2S$ . Essas mudanças químicas e biológicas têm implicações importantes para a cultura do arroz irrigado, na alteração da disponibilidade de nutrientes do solo e na eficiência dos fertilizantes.

## 2. TRANSFORMAÇÕES QUÍMICAS

### 2.1. Considerações gerais

Os solos inundados caracterizam-se por apresentar uma fina camada oxidada na parte superior, às custas do oxigênio dissolvido na água de irrigação, e uma camada reduzida, logo abaixo. Essa condição de oxidação e redução, que caracteriza uma lavoura de arroz irrigado por inundação contínua, resulta em certas transformações químicas no solo, conforme são resumidas a seguir:

- a) **camada oxidada:** o íon  $NH_4^+$  presente nessa camada é oxidado a  $NO_3^-$ , e sofre lixiviação e/ou perda por volatilização, pelo processo de desnitrificação. Os principais produtos da decomposição da matéria orgânica são  $CO_2$ ,  $NO_3^-$ ,  $SO_4^{2-}$  e resíduos resistentes à decomposição (húmus). Os íons Fe e Mn não são disponíveis para a planta, por se encontrarem na forma de  $Fe^{3+}$ ,  $Mn^{3+}$  e  $Mn^{4+}$ . Nessa camada pode acontecer do pH e da disponibilidade de fósforo serem baixos (Fig. 1);

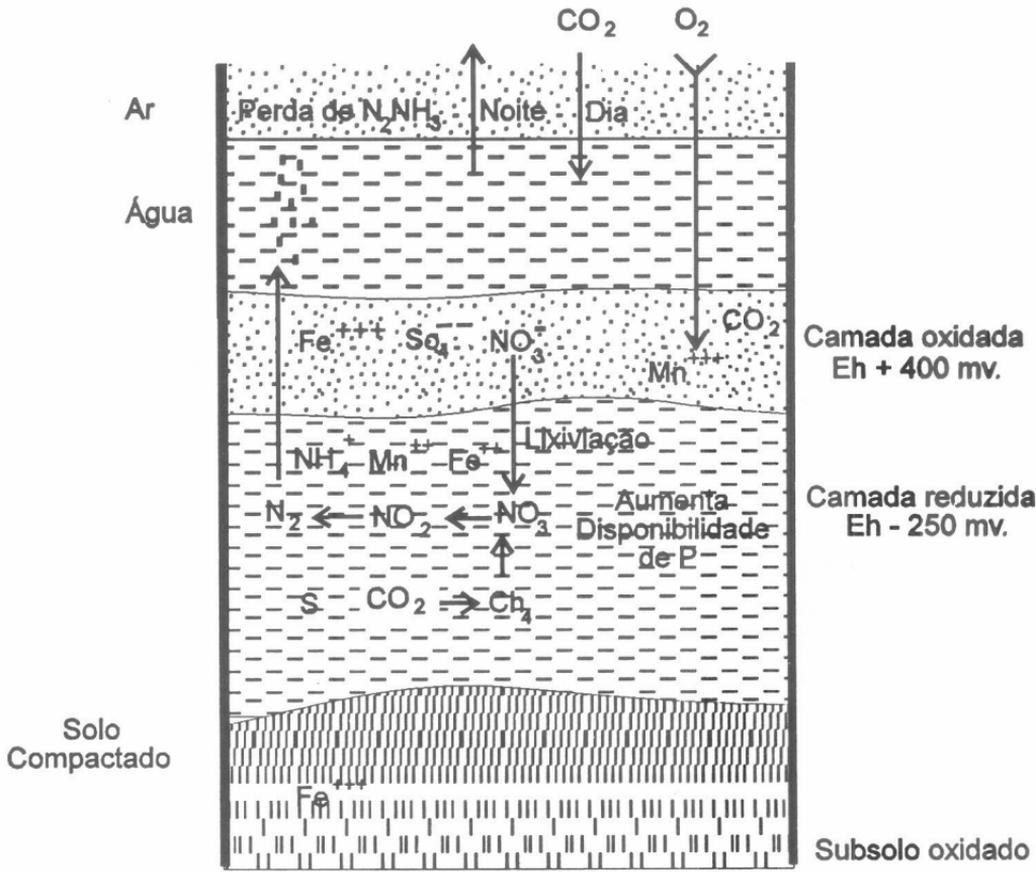


FIG. 1. Perfil típico de um solo inundado, mostrando as camadas oxidadas e reduzidas.

**b) camada reduzida:** as principais características dessa camada estão apresentadas a seguir:

- o N predomina na forma de  $\text{NH}_4^+$ , e como tal, não é perdido por lixiviação ou desnitrificação, pois é retido no complexo de troca;
- os óxidos de ferro e manganês são reduzidos a  $\text{Fe}^{2+}$  e  $\text{Mn}^{2+}$ ;
- ocorre um aumento do pH e da disponibilidade de P,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{HCO}_3^-$  e  $\text{Si}(\text{OH})_4$ ; e
- os principais produtos da decomposição da matéria orgânica são  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}^+$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{NH}_3$ , aminas,  $\text{H}_2\text{S}$  e resíduos parcialmente unificados (Fig. 1).

Ainda nas condições anaeróbicas (camada reduzida), os microorganismos (bactérias e algas, porque não existem fungos nessa camada), reduzem o  $\text{CO}_2$  a  $\text{CH}_4$  que se move para cima e é novamente oxidado na rizosfera, com formação de  $\text{CO}_2$ . As algas existentes na rizosfera durante o dia assimilam o  $\text{CO}_2$  e liberam  $\text{O}_2$  junto às raízes.

Em solos bem drenados, a decomposição da matéria orgânica é rápida, porque é feita por um grande número de microorganismos de respiração aeróbica, os quais necessitam de um maior nível de energia. Por outro lado, em solos inundados, a decomposição da matéria orgânica é feita por microorganismos facultativos e obrigatoriamente anaeróbicos, que necessitam de menor nível de energia, do que os aeróbicos.

A redução do solo em si não é prejudicial à cultura do arroz, a menos que o potencial redox alcance valores muito baixos, a ponto de permitir a formação de substâncias tóxicas à planta. Isso pode acontecer, quando o solo é

submetido à inundação contínua e prolongada. Nessas condições, poderá ocorrer a formação de sulfetos ( $S^{2-}$ ) e ácidos oriundos da fermentação da matéria orgânica (ácido butírico). Esses produtos, associados a altas concentrações de  $Fe^{2+}$ , causam injúrias às raízes, deposição de óxido de ferro nas raízes e inibem a absorção de nutrientes. A solução, portanto, para evitar esses problemas, resume-se em manter o solo numa condição adequada de redução, através das práticas de manejo de solo e da água, já que as raízes do arroz são capazes de manter um microambiente favorável a elas.

Dentre as medidas de controle recomendadas para diminuir o problema da toxidez de  $Fe^{2+}$ , podem ser citadas:

- a) **uso de cultivares tolerantes:** a CICA 8 tem se comportado como uma das cultivares mais tolerantes à toxidez de  $Fe^{2+}$ , enquanto que a BR/IRGA-409 mostrou ser uma das mais sensíveis (Tabela 1);
- b) **calagem:** tem sido relativamente eficiente para amenizar o problema da toxidez de ferro, principalmente nos casos em que se empregam doses maciças de calcário. Devido ao custo envolvido nessa prática, a incorporação de calcário pode ser feita, gradativamente, ao longo dos anos (Tabela 2);
- c) **adubação:** adubações mais equilibradas, principalmente com potássio e com fontes de fósforo ricas em silício, contribuem para diminuir os efeitos negativos da toxidez de ferro;

**TABELA 1.** Classificação de cultivares de arroz, para tolerância à toxidez 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 Dívida	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

MT = moderadamente tolerante; MS = moderadamente suscetível; T = tolerante; S = suscetível.

Fonte: Fageria et al. (1984).

**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)	Número médio de perfilhos/planta	Folha com sintoma (%)
Calcário - 4 t/ha	11,97	9,3	0
Esterco de curral - 20 t/ha	9,38	8,8	72
Palha de arroz - 10 t/ha	6,31	6,7	76
Pré-submersão quinze dias antes do transplantio	1,61	1,9	75
Pré-submersão 30 dias antes do transplantio	0,50	1,1	92
Submersão durante o transplantio e quinze dias depois desse, suspensão da água por sete dias, repetindo-se, em seguida, o manejo de água anterior	6,42	8,1	74
Submersão durante o transplante com renovação da água de sete em sete dias	3,95	4,6	75
Submersão durante o transplante, mantendo-se a água sem renovação durante todo o experimento	3,78	4,3	75
Idem ao tratamento anterior + termofosfato Yoorin como fonte de fósforo	5,54	5,3	74
DMS (Tukey, 5 %)	1,52	1,43	-

**d) manejo da água no solo:** essa prática tem por finalidade favorecer a oxigenação do solo, inibindo assim a redução do ferro (Fig. 2 e Tabela 3) e pode ser obtida através de:

- retardar a inundação; e
- promover drenagens no meio do ciclo da cultura.

## 2.2. pH em solos inundados

Em geral, o pH do solo aumenta após um certo período de inundação (Fig. 3). Entretanto, a magnitude desse aumento vai depender dos teores de matéria orgânica, de sulfatos, de ferro e do tipo de solo (calcário, sódico ou ácido).

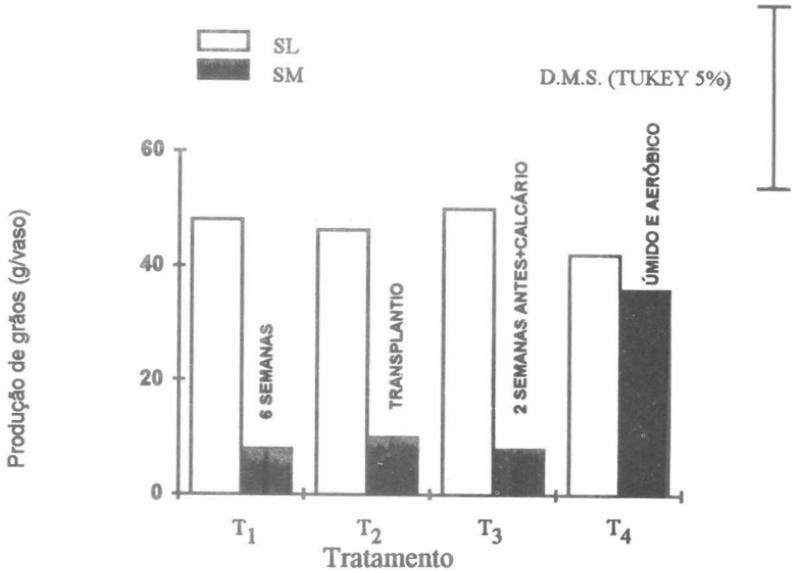
A maioria das reações de redução, que ocorrem no solo envolve o consumo de íons  $H^+$ , o que explica a elevação do pH (aumento na concentração de íons  $OH^-$ ).

A elevação do pH beneficia o arroz irrigado por inundação, porque elimina a toxidez de  $Al^{3+}$ , minimiza a toxidez de  $Fe^{2+}$  e aumenta a disponibilidade de P, Ca, Mg, K e outros íons.

## 2.3. Nitrogênio

O nitrogênio é o nutriente que, com mais freqüência, tem limitado a produção do arroz irrigado. Isso porque sofre uma rápida transformação e ocorrem perdas no solo.

A principal fonte de N no solo é a matéria orgânica, mas pode ser encontrado, também, na forma de  $NH_3$ ,  $NH_4OH$  e de íons  $NH_4^+$ ,  $NO_2^-$  e  $NO_3^-$ , ou ainda, pode ser adicionado ao solo através de fertilizantes.



T<sub>1</sub> = inundação seis semanas antes do transplântio;

T<sub>2</sub> = inundação e transplântio imediato;

T<sub>3</sub> = inundação duas semanas antes do transplântio + 2 t/ha de calcário;

T<sub>4</sub> = sem inundação, mas úmido e aeróbico.

SL - Solo de Leopoldina; SM - Solo de Muriaé.

Fonte: Barbosa Filho et al. (1983).

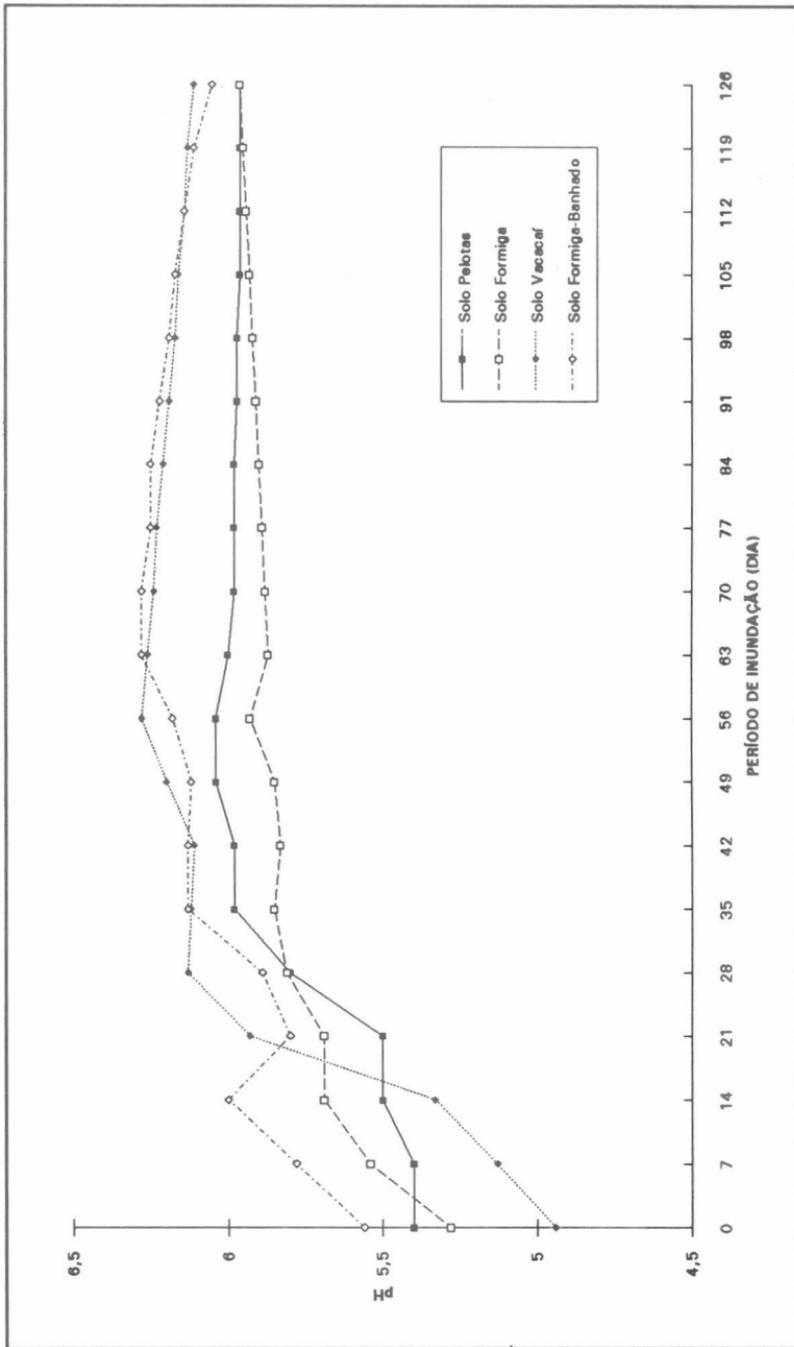
FIG. 2. Influência de diferentes tratamentos sobre a produção de grãos de arroz por vaso, em dois tipos de solos.

**TABELA 3.**

Relação entre os teores de macro e micronutrientes e o teor de ferro, na parte aérea das plantas de arroz em função dos tratamentos em solos coletados em Leopoldina (SL) e em Muriaé (SM) na Zona da Mata de Minas Gerais.

Tratamento	N/Fe	P/Fe	K/Fe	Ca/Fe	Mg/Fe	Zn/Fe	Cu/Fe	Mn/Fe
-----Solo SL-----								
T <sub>1</sub>	11,73	0,91	8,60	1,22	1,17	0,0239	0,0020	0,2438
T <sub>2</sub>	13,24	1,18	11,42	1,62	1,03	0,0290	0,0020	0,2546
T <sub>3</sub>	17,56	1,06	12,07	1,79	1,61	0,0346	0,0032	0,3757
T <sub>4</sub>	12,54	0,88	19,84	2,43	2,58	0,1010	0,0147	2,3304
Média	13,77	1,01	12,99	1,77	1,60	0,0471	0,0055	0,8011
-----Solo SM-----								
T <sub>1</sub>	2,48	0,44	5,52	0,62	0,59	0,0088	0,0006	0,2504
T <sub>2</sub>	4,47	0,45	6,70	0,63	0,63	0,0108	0,0016	0,1841
T <sub>3</sub>	3,76	0,48	6,78	0,81	0,74	0,0144	0,0010	0,2747
T <sub>4</sub>	17,55	1,36	21,62	2,93	2,51	0,1160	0,0188	2,3542
Média	7,06	0,68	10,15	1,25	1,21	0,0375	0,0055	0,7659

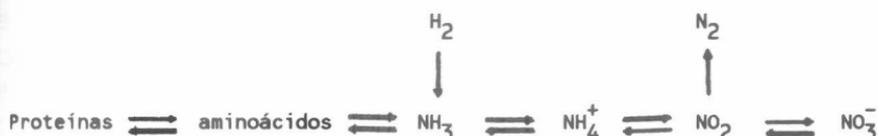
Fonte: Barbosa Filho et al. (1983).



Fonte: Moraes; Freire (1974).  
 FIG. 3. Variação do pH dos solos durante a inundação.

### 2.3.1. Mineralização

A mineralização do nitrogênio em solos bem drenados ocorre basicamente em três reações: aminização, amonificação e nitrificação. Em condições anaeróbicas, a mineralização do nitrogênio termina com a reação de amonificação, devido à falta de oxigênio para continuar a reação de redução de nitrito para nitrato. As principais reações da mineralização da matéria orgânica são resumidas a seguir:



Através da digestão enzimática desses compostos da matéria orgânica é que os microorganismos heterotróficos adquirem energia e assimilam parte do nitrogênio para sua multiplicação (imobilização). Pelo fato desses microorganismos necessitarem de menor quantidade de nitrogênio, pode-se observar uma liberação desse elemento, mesmo que a relação C:N seja maior do que em solos bem drenados. Portanto, a mineralização em solos alagados pode ser consideravelmente maior do que em solos bem drenados.

Em síntese, os resultados de pesquisa sobre mineralização indicam que:

- solos ricos em matéria orgânica podem dispensar adubação nitrogenada;
- solos com teores médios de matéria orgânica necessitam de uma adubação na base;
- solos pobres em matéria orgânica necessitam de uma aplicação de nitrogênio na base e uma em cobertura;

- d) solos arenosos e de drenagem rápida necessitam de várias aplicações de nitrogênio, por causa das perdas por lixiviação; e
- e) a incorporação de restos culturais com alta relação C:N pode diminuir a disponibilidade de nitrogênio nas primeiras semanas de inundação.

### 2.3.2. Denitrificação

A denitrificação consiste na transformação do íon nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) em óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) e nitrogênio elementar ( $\text{N}_2$ ). É um processo respiratório, no qual certos microorganismos do solo substituem o oxigênio molecular ( $\text{O}_2$ ) pelo ânion nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ).

A denitrificação é uma das principais causas de perda de nitrogênio em solos inundados. Quando ocorre falta de  $\text{O}_2$  ou a quantidade é insuficiente para a respiração anaeróbica dos microorganismos facultativos, esses passam a utilizar as formas oxidadas de nitrogênio como fonte de oxigênio, reduzindo-as a  $\text{N}_2\text{O}$  e  $\text{N}_2$ . Esse processo é limitado a diversas espécies de bactérias aeróbicas, pertencentes aos gêneros **Pseudomonas**, **Micrococcus**, **Bacillus** e **Achromabacter** sp.

O íon nitrato, por ser solúvel e estar numa forma muito oxidada, é também a forma mais utilizada por uma gama de microorganismos. A rapidez com que o nitrato desaparece em solos inundados vai depender da disponibilidade de energia no meio de crescimento.

O processo de denitrificação tem uma implicação prática quando se considera o manejo de fertilizantes nitrogenados. Se fertilizantes amoniacais ( $\text{NH}_4^+$ ) são usados como fonte de nitrogênio, e esse é aplicado na

camada oxidada, o íon amônio ( $\text{NH}_4^+$ ) é oxidado a nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), o qual é lixiviado e/ou perdido por volatilização (denitrificação). Assim sendo, o fertilizante deve ser aplicado de forma mais profunda, para atingir a camada redutora.

Tendo em vista que a planta de arroz desenvolve um abundante sistema radicular próximo à superfície do solo e que absorve rapidamente o N, a aplicação em cobertura, a lanço, na lâmina d'água, tem sido comprovada como um método eficiente de aplicação de nitrogênio.

Se não há formação da camada compactada logo abaixo da zona reduzida, podem ocorrer grandes perdas de nitrogênio através da água de percolação. O íon amônio ( $\text{NH}_4^+$ ), dado a sua carga positiva, apresenta menor possibilidade de lixiviação. A uréia não hidrolizada pode penetrar além da zona de alcance das raízes, por ser fracamente retida pelo solo e, em consequência, pode ocorrer menor aproveitamento do nitrogênio.

Portanto, a fonte de nitrogênio, modo e época de aplicação do mesmo e a natureza do solo são fatores importantes a serem considerados, por ocasião da adubação.

#### 2.4. Ferro

Em um solo bem drenado, o Fe é encontrado na forma de  $\text{Fe}^{3+}$  (insolúvel); em solos inundados esse  $\text{Fe}^{3+}$  é reduzido à forma de  $\text{Fe}^{2+}$  (solúvel). Isso acontece depois que os microorganismos utilizam o  $\text{O}_2$  e o  $\text{NO}_3^-$  dissolvidos na solução do solo, quando então passam a usar, como fonte de elétrons, os compostos de  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Mn}^{3+}$  e  $\text{Mn}^{4+}$ .

Com a inundação, a redução do  $\text{Fe}^{3+}$  para

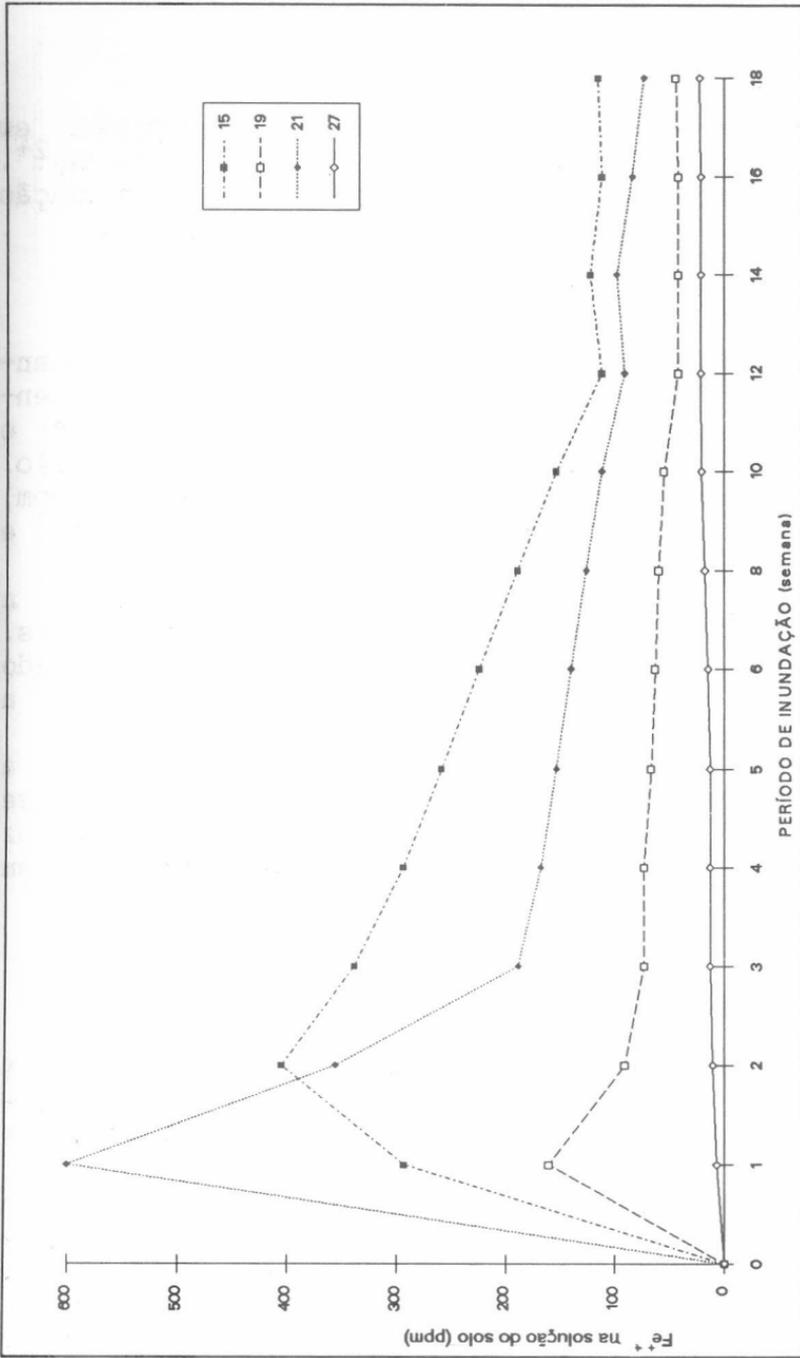
$\text{Fe}^{2+}$  faz com que a concentração de  $\text{Fe}^{2+}$  aumente inicialmente, alcance um máximo e depois caia até atingir um nível de estabilização, que persiste por vários meses (Fig. 4). A reação que ocorre é a seguinte:



A queda na concentração de  $\text{Fe}^{2+}$  é causada pela precipitação do  $\text{Fe}^{2+}$  como  $\text{FeCO}_3$  e  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ .

O  $\text{Fe}^{2+}$  solúvel é necessário ao bom desenvolvimento do arroz. Porém, em solos ácidos sua concentração pode atingir um nível tóxico para essa cultura. Em geral, a concentração de  $\text{Fe}^{2+}$  na solução do solo é baixa, raramente ultrapassando 0,1 ppm. No entanto, como as quantidades de ferro na fase sólida do solo são geralmente grandes, a concentração, na solução do solo, pode alcançar a faixa de centenas de ppm, provocando toxidez às plantas. Esse efeito nocivo pode ser observado numa ampla faixa de concentração de  $\text{Fe}^{2+}$ , na solução do solo (50 a 300 ppm ou mais). Isso significa que nem sempre é fácil associar concentração de  $\text{Fe}^{2+}$  na solução do solo com sintomas de toxidez, desse nutriente, na planta. O nível crítico de  $\text{Fe}^{2+}$  na solução do solo pode variar, dependendo do tipo de solo, do teor de matéria orgânica, do pH da solução do solo, do teor de ferro e do estado nutricional da planta.

Como exemplo, tem-se a interação entre Fe e K em arroz irrigado, onde altos níveis de  $\text{Fe}^{2+}$  na solução do solo diminuem a absorção de K, e a adubação com esse elemento decresce a absorção de  $\text{Fe}^{2+}$ . Isso significa que a adubação potássica não só corrige a deficiência do elemento, mas também impede uma absorção excessiva de  $\text{Fe}^{2+}$ .



Fonte: Ponnamperuma (1977).

FIG. 4 Dinâmica de  $Fe^{2+}$  na solução de cinco solos inundados.

## 2.5. Manganês

A principal transformação do manganês em solos inundados é a redução do  $\text{MnO}_2$  para  $\text{Mn}^{2+}$ . A redução do  $\text{MnO}_2$  ocorre logo após a redução do  $\text{NO}_3^-$  e a reação que ocorre é a seguinte:



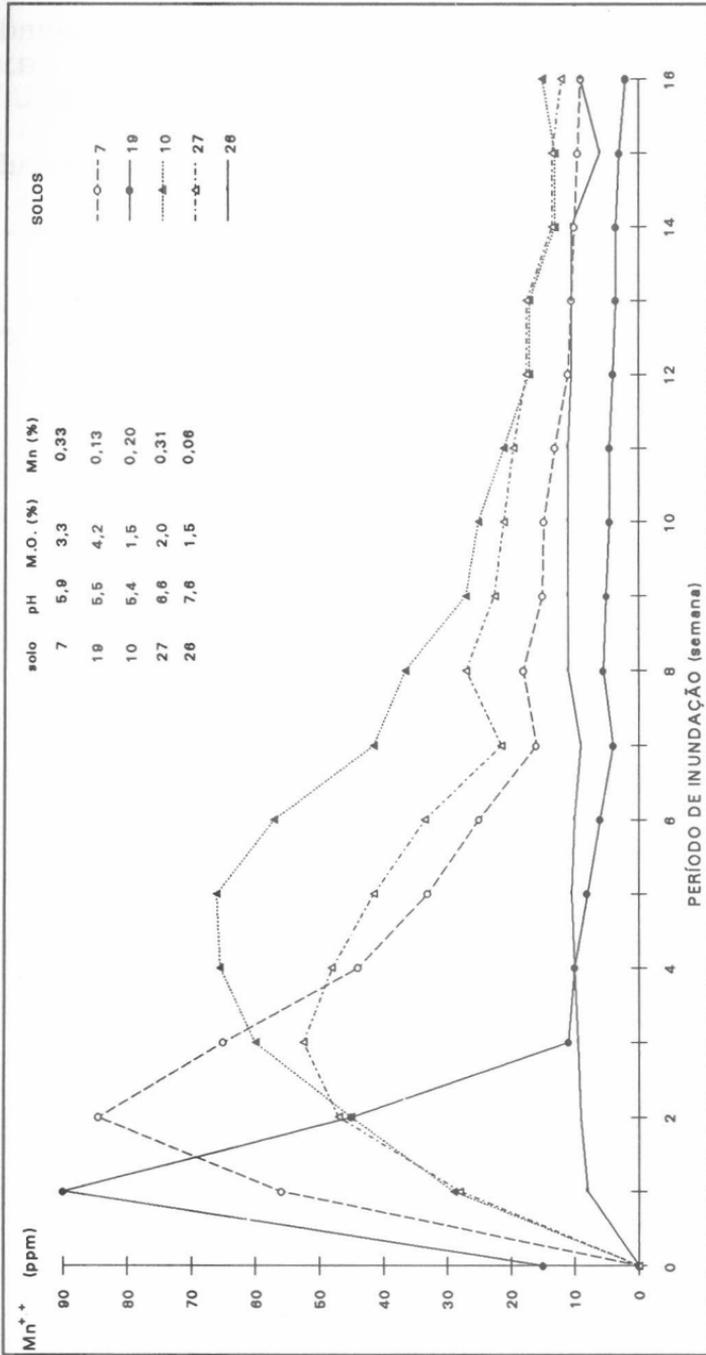
Como consequência, há um aumento na concentração de  $\text{Mn}^{2+}$  na solução do solo. A concentração de  $\text{Mn}^{2+}$  depende, sobretudo, do pH e dos teores de matéria orgânica e Mn do solo. Em geral, as maiores concentrações (60-90 ppm) são observadas em solos ácidos, ricos em Mn e matéria orgânica (Fig. 5).

Quando um solo é drenado, o ar penetra e reoxida tanto o ferro como o manganês. Entretanto, o  $\text{Fe}^{2+}$  é mais facilmente oxidado do que o  $\text{Mn}^{2+}$  e é rapidamente convertido a óxidos de ferro.

Embora a inundação do solo aumente a disponibilidade de  $\text{Mn}^{2+}$ , a toxidez desse nutriente não tem sido muito comum em arroz irrigado, a não ser em áreas que apresentem jazidas de Mn.

## 2.6. Enxofre

Em solos inundados, o íon sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) é reduzido a sulfeto. Ocorre também o desdobramento de aminoácidos (cistina, cisteína e metionina) a  $\text{H}_2\text{S}$  e a outros ácidos. Mas, o principal produto da transformação anaeróbica do enxofre é o  $\text{H}_2\text{S}$ . Esse  $\text{H}_2\text{S}$  formado pode reagir com metais pesados, originando sulfetos insolúveis, como, por exemplo, o  $\text{FeS}$  ou  $\text{ZnS}$ . Além disso, pode também funcionar como fornecedor de  $\text{H}^+$  para as bactérias fotossintetizantes ou pode ser oxidado.



Fonte: Ponnampuruma (1977).

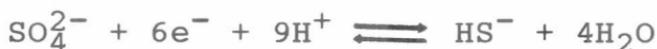
FIG. 5. Dinâmica de  $Mn^{2+}$  na solução de cinco solos inundados.

O mau odor das algas azuis-esverdeadas putreficantes, encontrado em açudes tem sido atribuído ao dimetil sulfeto, metil, butil e isobutil tiol.

A redução do sulfato em solos inundados pode ter como conseqüências:

- a) o suprimento de S pode tornar-se insuficiente;
- b) zinco e cobre podem ser imobilizados; e
- c) pode ocorrer toxidez de  $H_2S$  em solos com baixo teor de ferro.

A reação de redução do sulfato é a seguinte:



A formação de sulfetos ocorre em solos com potencial redox (Eh) muito baixo, isto é, quando os solos são altamente reduzidos. O  $S^{2-}$  inibe a respiração e o poder de oxidação das raízes, tornando-as mais sensíveis à toxidez de  $Fe^{2+}$  e diminuindo a absorção de nutrientes.

Embora as raízes do arroz tenham capacidade de oxidar o  $S^{2-}$ , pode haver toxidez de  $H_2S$ , pois isso vai depender da concentração de sulfetos na solução do solo e da capacidade de oxidação das raízes. Quando ocorre toxidez de  $H_2S$ , ocorre também toxidez de Fe, porque o  $H_2S$  destrói a capacidade de oxidação das raízes e, com isso, a planta absorve grandes quantidades de Fe.

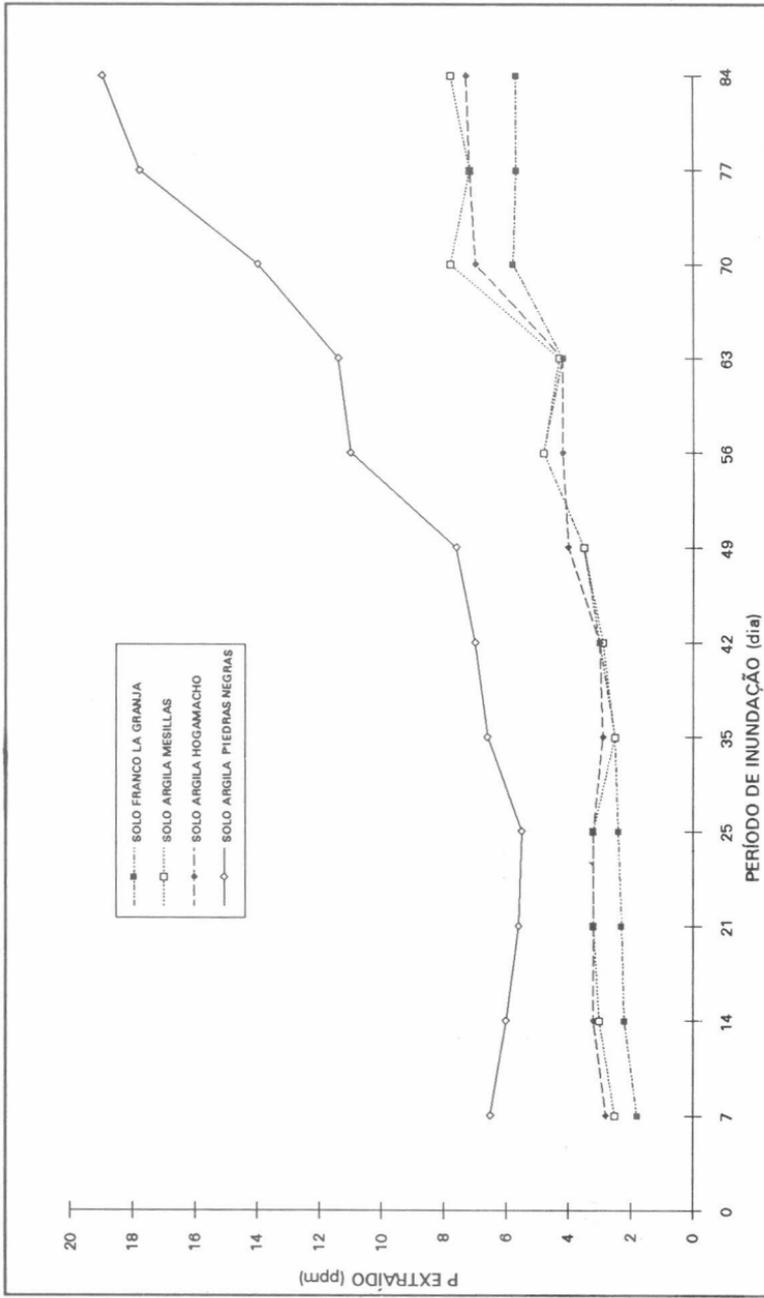
Em solos pobres em Fe, grande parte do  $H_2S$  permanece na solução do solo, podendo causar toxidez ao arroz. Por outro lado, em solos ricos em Fe, o  $H_2S$  reage com esse elemento para formar  $FeS$  (pirita) insolúvel e, portanto, não tóxico. Essa observação tem importância prática na escolha da fonte de nitrogênio a ser usada. Por exemplo, em solos com baixos teores de Fe, a recomendação do

sulfato de amônio poderá ser desaconselhada devido à redução do  $\text{SO}_4^{2-}$  a  $\text{H}_2\text{S}$ , podendo esse último atingir níveis tóxicos para o arroz e inibir a absorção de nutrientes. Nesse caso, é preferível usar a uréia. Por outro lado, em solos pobres em enxofre ou ricos em Fe, o sulfato de amônio pode ser superior à uréia.

## 2.7. Fósforo

Outra transformação importante que ocorre nos solos inundados é o aumento da disponibilidade do fósforo. Porém, esse aumento não é igual para todos os solos. Sua liberação tanto pode ser muito baixa em solos ácidos, argilosos e ricos em ferro, como pode ser alta em solos arenosos e pobres em Fe e Mn (Fig. 6). Por essa razão, certas culturas plantadas em solos de várzea podem mostrar respostas marcantes à aplicação de fósforo, enquanto que o arroz irrigado, cultivado na mesma área, pode mostrar baixa ou nenhuma resposta ao fósforo. Nesses casos, onde o solo permanece submerso durante todo o ciclo da cultura, existe pequena diferença de resposta às diversas fontes de fósforo, se comparada com as condições de sequeiro, a não ser em casos extremos em que o solo apresente teores muito baixos de fósforo.

Os principais mecanismos responsáveis pela maior disponibilidade do P nos solos inundados, tanto do P nativo como P aplicado, são, entre outros: o aumento do pH, que favorece a liberação do P das posições de troca das argilas e óxidos hidratados de Fe e de Al para a solução do solo; e, principalmente, a redução do fosfato férrico -  $\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  - para a forma mais solúvel, fosfato ferroso -  $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ . Entretanto, nenhuma relação é



Fonte: Moraes (1971).

FIG. 6. Fósforo extraído dos solos inundados, com resina de intercâmbio aniônico.

observada entre P "disponível", em solo bem drenado e P "disponível", em solos inundados. Pode acontecer, portanto, que em solos aeróbicos de várzeas, aparentemente ricos em P, ocorra baixa capacidade de suprimento de P às plantas, devido ao fosfato de ferro estar na forma insolúvel.

Após um certo tempo de inundaçãõ, observa-se uma diminuiçãõ no teor de P "disponível" (Fig. 6). Essa diminuiçãõ é explicada pela readsorçãõ dos fosfatos pela argila ou pelos óxidos e hidróxidos de Al e é maior em solos argilosos que em solos arenosos.

## 2.8. Potássio

À semelhança do fósforo, a quantidade de potássio dos solos inundados, é aumentada pela adiçãõ de potássio, pela água de irrigaçãõ e/ou pelo deslocamento desse elemento, dos sítios de troca para a soluçãõ do solo. Nesse último caso, o ferro, pela quantidade presente na maioria dos solos, influi muito na disponibilidade de potássio e outros elementos para o arroz.

Há situações, entretanto, em que pode ocorrer uma reduçãõ no teor de potássio disponível, como, por exemplo, no caso de solos com baixa capacidade de suprimento desse elemento ou de baixa capacidade de troca catiônica (CTC), após alguns cultivos de altos rendimentos. Nessas condições, o potássio deve ser repostõ no solo, por meio de adubações mais equilibradas.

## 2.9. Cálcio e magnésio

Do mesmo modo que o potássio, a liberação do cálcio e do magnésio em solos inundados é grande, principalmente quando se faz uma adubação. Os íons  $K^+$  e  $NH_4^+$ , aplicados como adubos, deslocam o  $Ca^{2+}$  e  $Mg^{2+}$  do complexo de troca para a solução do solo.

## 2.10. Micronutrientes

Não se sabe com certeza se o B, Co, Cu, Mo e Zn estão envolvidos nas reações de oxidação-redução, mas sabe-se que a mobilidade desses micronutrientes é afetada pela inundação do solo. A disponibilidade do Co, Cu e Zn pode ser afetada em duas situações:

- a) quando ocorre redução dos óxidos hidratados de  $Fe^{3+}$  e  $Mn^{3+}$  e produção de agentes orgânicos complexantes, há um aumento da disponibilidade desses nutrientes; e
- b) quando há aumento do pH de solos ácidos e formação de sulfetos (solos altamente reduzidos), há diminuição da disponibilidade.

## 3. ADUBAÇÃO

### 3.1. Adubação de plantio

Para adubação de plantio em fileiras, feita em solo seco, a regra básica é colocar o adubo na camada redutora do solo, no sulco e a uma profundidade de 5-10 cm, abaixo ou ao lado da semente (a camada redutora se desenvolve de 3-5 dias após a inundação).

No caso de plantio a lanço ou por mudas, a adubação deve ser feita a lanço, com posterior incorporação ao solo.

Com base nas recomendações de N,  $P_2O_5$  e  $K_2O$ , são determinadas fórmulas de adubação mais apropriadas, devendo-se dar sempre preferência para fórmulas mais concentradas, com o objetivo de reduzir o custo de transporte e aplicação.

A adubação NPK deve ser feita na base, por ocasião do plantio. Por outro lado, o arroz absorve nitrogênio durante todo o seu ciclo, existindo duas fases fisiológicas críticas: no perfilhamento e por ocasião do aparecimento do primórdio floral. Uma aplicação na base e duas aplicações em cobertura podem ocasionar, em alguns casos, perda de nitrogênio (solos arenosos) ou estimular muito o crescimento das plantas e, com isso, provocar maior incidência de doenças e acamamento. A recomendação geral, portanto, é aplicar parte do nitrogênio no plantio e parte em cobertura, por ocasião da diferenciação do primórdio floral ( $1/3 + 2/3$ ).

### 3.2. Adubação de cobertura

A aplicação de nitrogênio em cobertura pode ser feita basicamente por duas modalidades:

- a) **a lanço, após a retirada da água:** nesse caso, as desvantagens são: necessidade de mão-de-obra adicional para tirar e repor a água, e maior dificuldade de andar no terreno;
- b) **a lanço, sobre a lâmina d'água:** nesse caso, não se deve fazer renovação da água de irrigação, pelo menos por ocasião da adubação, para evitar perdas de nitrogênio.



Quanto às fontes de nitrogênio, o sulfato de amônio e a uréia são as duas mais vantajosas para o arroz irrigado, não havendo diferença de resposta da planta entre elas. Porém, em certas situações, como por exemplo em solos pobres em ferro, recomenda-se a uréia, e em solos pobres em enxofre recomenda-se o sulfato de amônio.

#### 4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARBOSA FILHO, M.P.; FAGERIA, N.K.; STONE, L. F. Manejo d'água e calagem em relação à produtividade e toxicidade de ferro em arroz. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.18, n.8, p.903-1910, 1983.
- FAGERIA, N.K.; BARBOSA FILHO, M.P.; CARVALHO, J.R.P.; RENGEL, P.H.N., CUTRIM, V.A. Avaliação preliminar de cultivares de arroz para tolerância à toxidez de ferro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.19, n.10, p.1271-1278, 1984.
- FREIRE, F.M.; NOVAIS, R.F.; SOARES, P.C.; COSTA, L.M.; FARIA, E. Calagem, adubação orgânica e manejo da água no controle da toxicidade de ferro em arroz irrigado. **Revista Ceres**, Viçosa, v.32, n.180, p.162-169, 1985.
- MORAES, J.F.V. **El uso de la resina de intercambio anionico (amberlita IRA-400) para evaluar el fosforo en 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 à inundação. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.9, p.35-43, 1974.

PONNAMPERUMA, F.N. **Specific soil chemical characteristics for rice production in Asia**. Los Baños: IRRI, 1977. 18p. (IRRI. Research Paper Series, 2)