

**FUNDAÇÃO CARGILL**

**ANAIS DO**  
**II SIMPÓSIO AVANÇADO DE SOLOS**  
**E NUTRIÇÃO DE PLANTAS**

**COORDENADORES**

**ANTONIO ROQUE DECHEN**

**QUIRINO AUGUSTO DE CAMARGO CARMELLO**

**ELMAR LUIZ FLOSS**

TEMA: QUÍMICA DE SOLOS DE VÁRZEA

- NAND KUMAR FAGERIA

CENTRO NACIONAL DE PESQUISA DO ARROZ E FEIJÃO  
CENPAF/EMBRAPA

DEBATEDORES:

- SÉRGIO JORGE VOLKWEISS

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
PORTO ALEGRE

- LUIZ ROBERTO GUIMARÃES GUILHERME

ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA DIFUSÃO DE  
FERTILIZANTES E CORRETIVOS AGRÍCOLAS (ANDA)

## QUÍMICA DE SOLOS DE VÁRZEA

Nand K.Fageria\*

## 1. INTRODUÇÃO

Antes de discutir a química de solos de várzea é mais apropriado definir o que significa várzeas. De acordo com Lamster (1980) várzeas são os solos aluviais e/ou hidromórficos, geralmente planos e ricos em matéria orgânica, facilmente irrigáveis, na maioria dos casos até por gravidade, de fertilidade elevada, inundado temporariamente ou não (margens de córregos, rios, vales úmidos), porém apresentando muitas vezes umidade excessiva, necessitando por isso de drenagem adequada. FREIRE e NOVAIS (1980) mencionaram que as várzes são constituídas de solos originários de decomposição de materiais transportados por cursos d'água ou mesmo trazidos das encostas pelo efeito erosivo das chuvas. Constituem-se em áreas de baixadas. Podendo estar encharcadas em consequência da elevação do lençol freático, sujeitas ou não a inundações periódicas. NETO e MACEDO (1981) classificaram as terras de várzeas como solos situados ao longo dos cursos d'água ou áreas deprimidas mal drenadas, sob vegetação de mata ou campo higrófilo utilizados na época da seca como pastagem natural.

Essencialmente, essas definições mostraram parâmetros comuns. É possível, então, caracterizar as várzeas como áreas condicionadas a um regime de excesso de umidade e a processos químicos de redução de alta variabilidade de solos, sob vegetação de mata ou campo higrófilo (RASSINI *et al.* 1984, KLAMT *et al.* 1985).

De acordo com o Ministério da Agricultura (1982), o Brasil possui 4% da terra e 8% da água doce do mundo, a maior bacia hidrográfica e 30 milhões de hectares de várzeas irrigáveis sem aproveitamento. A Tabela 1 mostra o potencial de várzeas em cada estado brasileiro.

\* Pesquisador do Centro Nacional de Pesquisa de Arroz e Feijão da EMBRAPA, Caixa Postal 179, 74000 Goiânia, GO.

Trabalho apresentado no "II Simpósio Avançado de Solos e Nutrição de Plantas", realizado na ESALQ/USP no período de 10 a 13 de outubro de 1989. Piracicaba, SP

Tabela 1. Potencial de várzeas irrigáveis no Brasil

Estado ou Território	Área (x 10 <sup>6</sup> ha)
Amazonas	8,00
Pará	6,00
Rio Grande do Sul	1,80
Paraná	1,60
Minas Gerais	1,50
Mato Grosso	1,40
Goiás e Tocantins	1,40
Mato Grosso do Sul	0,82
Amapá	0,81
São Paulo	0,68
Ceará	0,54
Espírito Santo	0,44
Maranhão	0,43
Roraima	0,37
Rio de Janeiro	0,36
Piauí	0,34
Bahia	0,28
Santa Catarina	0,26
Paraíba	0,26
Rio Grande do Norte	0,20
Pernambuco	0,14
Alagoas	0,11
Sergipe	0,03
Rondônia	0,01
Acre	*
	*
Total	24,94

\* Dados não disponíveis

Fonte: Ministério da Agricultura, 1982.

Apenas no triângulo Rio de Janeiro-Belo Horizonte-São Paulo, região de melhor infra-estrutura do país, existem ainda 3 milhões de hectares de várzeas irrigáveis, dos quais a metade é irrigável por declividade natural

(Ministério da Agricultura, 1982). Nas regiões de cerrados, estima-se uma área de aproximadamente 12 milhões de hectares de várzeas que podem ser utilizados para cultivo de três safras por ano (RASSINI *et al.* 1984).

Visando o grande potencial de várzeas no Brasil e as poucas informações disponíveis sobre os solos de várzeas, é importante a discussão destes no que diz respeito ao seu manejo para a produção agrícola.

## 2. CONCEITOS DOS SOLOS ALAGADOS

Os solos alagados podem ser colocados nos seguintes grupos:

- Solos inundados
- Solos pantanosos
- Solos irrigados

**SOLOS INUNDADOS** - São solos saturados com água, em tempo suficiente para criar características de horizonte gley pelo processo de oxidação-redução. Nestes solos existem três horizontes como: a) Horizonte A parcialmente oxidado com alto teor de M.O. b) Zona alterada de oxidação-redução e c) Zona de redução permanente e saturada com água. No segundo horizonte o ferro e manganês acumulam e dão cor ferrugem por causa da baixa difusão de oxigênio. Na zona de redução permanente a cor verde-azul é devida à presença de ferro ferroso.

**SOLOS PANTANOSOS** - São solos com saturação mais ou menos permanente. As características específicas destes solos, são acumulação dos resíduos de plantas na camada superficial e com zona reduzida permanente em baixo.

**SOLOS IRRIGADOS** - São solos cujos manejo é especial para cultivo de arroz irrigado. As práticas de manejo incluem:

- a) nivelamento da terra e construção de marachas para acumulação da água.
- b) manter a água 5-10cm durante o ciclo da cultura.
- c) drenagem da água antes da colheita.

### 3. CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS DE VÁRZEAS

De acordo com o Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos da EMBRAPA (1980), os solos de várzeas no Brasil podem ser enquadrados nas seguintes classes:

1. Planossolo
2. Plintossolo
3. Solos Halomórficos: Solonetz-Solodizado, Solonetz-Solodizado Salino
4. Brunizem Hidromórfico
5. Vertissolo
6. Glei Húmico e Glei pouco Húmico
7. Glei Tiomórfico
8. Cambissolo
9. Solos orgânicos
10. Areias quartzosas Hidromórficas
11. Solos Aluviais

### 4. TRANSFORMAÇÕES QUÍMICAS EM SOLOS INUNDADOS

As propriedades químicas de um solo sofrem drásticas transformações quando ele é submetido à inundação. Estas transformações são as consequências de reações físicas entre solo e água, bem como de processos químicos e biológicos, pelo excesso de água. A estrutura do solo, que é considerado o fator mais importante em solos bem drenados, sempre será destruída pela acumulação de água no seu espaço poroso.

As inundações provocam mudanças no solo, convertendo a zona onde as raízes se desenvolvem de aeróbica a anaeróbica, extinguindo o oxigênio ou tornando-o limitado. Sob condições anaeróbicas, ocorrem vários processos de redução. Estas transformações têm implicações importantes para a cultura do arroz irrigado.

#### 4.1. Estabelecimento de Zona de Oxidação e Redução

Os solos inundados são completamente diferentes de solos bem drenados. Nestes, há oxigênio disponível, do qual necessitam os microorganismos e

as plantas. Esta situação muda completamente quando o solo é inundado. A difusão do oxigênio através da água de inundação é muito lenta, em comparação à velocidade de redução do oxigênio na camada do solo, reduzida por causa do maior consumo de oxigênio disponível, resultando na formação de duas zonas distintas e diferentes no solo inundado: a zona de oxidação e a zona de redução.

A Figura 1 mostra estas mudanças num solo inundado. A espessura da camada oxidada é determinada pela velocidade de consumo de oxigênio no solo e pela velocidade de fornecimento de oxigênio através da água; se a velocidade de consumo for maior, resultará na formação de camada oxidada muito fina (mais ou menos um milímetro de espessura). Por outro lado, se a taxa de consumo de oxigênio for baixa, resultará em camada mais espessa (até vários centímetros de espessura).

#### 4.2. pH em Solos Submersos

Quando um solo é inundado, o seu pH decresce durante os primeiros dias e, depois, estabiliza em torno de 6,5, poucas semanas mais tarde. O efeito total da inundação é aumentar o pH de solos ácidos e diminuir o pH de solos alcalinos. Assim, a inundação converge os valores de pH de solos ácidos (exceto aqueles baixos em ferro) e solos alcalinos a valores entre 6 e 7. A Figura 2 mostra estas mudanças.

A diminuição rápida do pH no primeiro dia após a submersão é provavelmente devido à acumulação de CO<sub>2</sub> produzido pela respiração das bactérias aeróbicas. O subsequente aumento do pH dos solos ácidos é devido o consumo de íons H<sup>+</sup> nas reações de redução. As equações da Tabela 2 mostram que para a redução do ferro são consumidos 3 íons H<sup>+</sup> para cada elétron (e<sup>-</sup>) transferido; a redução do manganês exige 2 íons H<sup>+</sup> por cada elétron e as demais reações exigem apenas 1 íon H<sup>+</sup> para cada elétron. O aumento de pH pela redução do ferro férrico de óxido ou hidróxido para ferro ferroso solúvel pode ser explicado pela seguinte reação:



A estabilização do pH depois de algumas semanas de inundação é devida ao equilíbrio entre as formas oxidadas e reduzidas do ferro (MORAES, 1984):



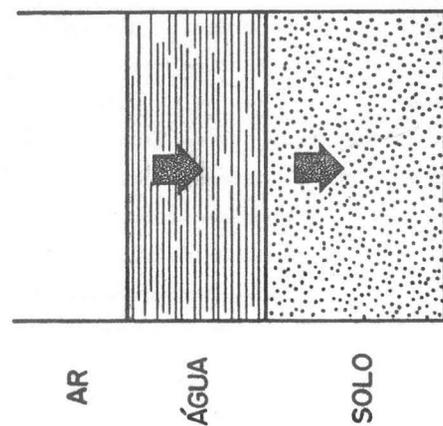
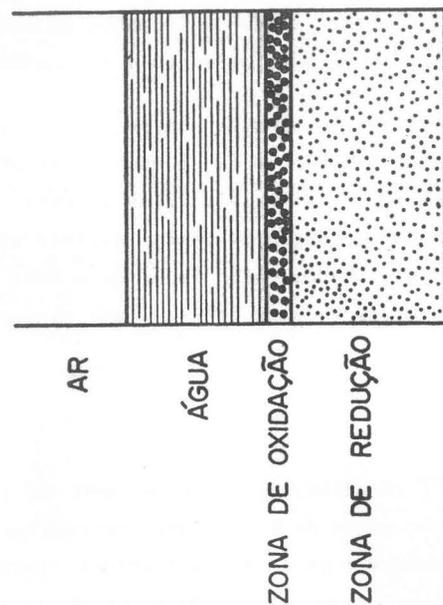


Fig. 1. Taxa relativa de movimentação do oxigênio através da água e consumo de oxigênio no solo (esquerda). Diferença da zona de oxidação e redução em solo inundado (direita). (Adaptada de PATRICK & MAHAPATRA, 1968)

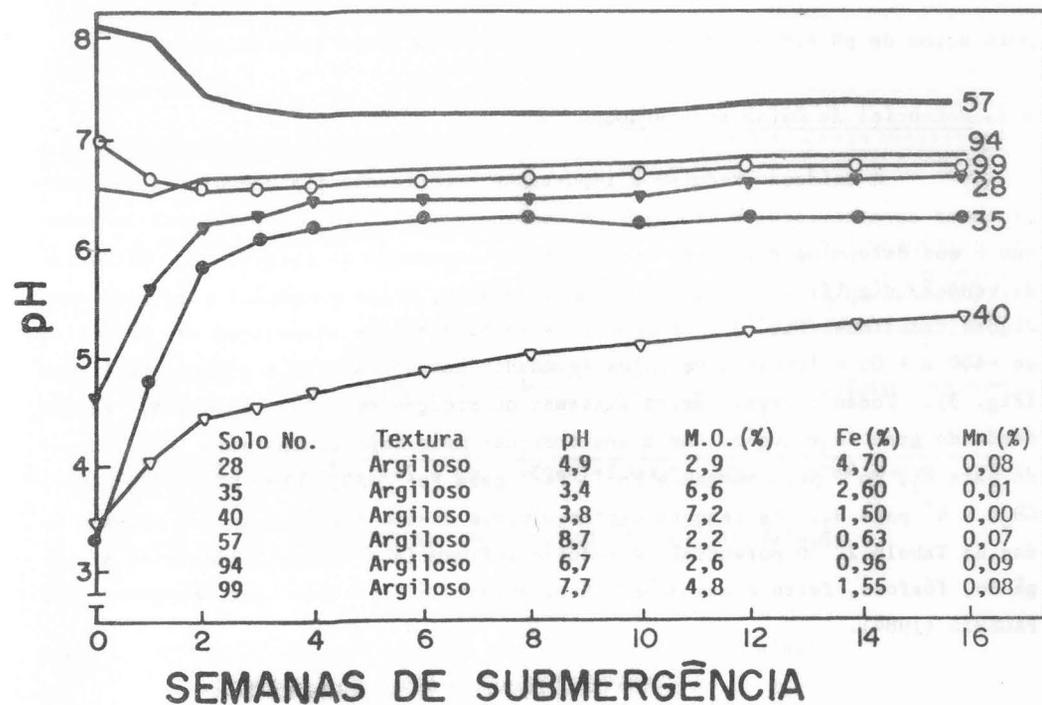


Fig. 2. Mudança de pH na solução de seis solos submersos (Adaptada de PONNAMPERUMA, 1972).

Tabela 2. Algumas reações de redução nos solos inundados

Reação	Eh (mV)
$O_2 + 4H^+ + 4e^- = 2H_2O$	+ 814
$NO_3^- + 6H^+ + 5e^- = 1/2 N_2 + 3H_2O$	+ 741
$MnO_2 + 4H^+ + 2e^- = Mn^{2+} + 2H_2O$	+ 401
$Fe(OH)_3 + 3H^+ + e^- = Fe^{2+} + 3H_2O$	- 185
$SO_4^{2-} + 10H^+ + 8e^- = H_2S + 4H_2O$	- 214
$CO_2 + 8H^+ + 8e^- = CH_4 + 2H_2O$	- 244
$2H^+ + 2e^- = H_2$	- 413

pois acima de pH 6.0 ocorre a oxidação química do ferro e do Manganês.

#### 4.3. Potencial de Oxidação - Redução

A oxidação-redução é importante propriedade físico-química que controla as características bioquímicas dos solos inundados. O potencial de redução é que determina a intensidade de oxidação-redução no solo. Alto potencial de redução significa condições oxidadas no solo; baixo potencial significa condições reduzidas (Fig. 3). Enquanto os solos drenados alcançaram um potencial de +400 a +700 milivolts, os solos inundados caem para -250 a -300 milivolts (Fig. 3). Podem ocorrer vários sistemas de redução em solos inundados, dependendo do grau de redução. As transformações mais importantes são:  $\text{NO}_3^-$  reduzido para  $\text{N}_2$ ,  $\text{Mn}^{4+}$  para manganês  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  para  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  para  $\text{S}^{2-}$ ,  $\text{CO}_2$  para  $\text{CH}_4$ , e  $\text{H}^+$  para  $\text{H}_2$ . As reações eletroquímicas destes sistemas estão apresentadas na Tabela 2. O potencial de redução influencia a disponibilidade de nitrogênio, fósforo, ferro e manganês. Este assunto é discutido detalhadamente por FAGERIA (1984).

#### 4.4. Transformação e disponibilidade de nutrientes em solos inundados

##### 4.4.1. Nitrogênio

A Fig. 4 mostra a transformação de nitrogênio em solos inundados. Os dois processos mais importantes de transformação de nitrogênio em solos inundados são: nitrificação e desnitrificação, mas o primeiro é pouco importante em comparação ao segundo.

##### Nitrificação

É um processo de oxidação enzimática ocasionado por certas bactérias. Ocorre aparentemente em duas fases coordenadas, em que estão incluídos dois grupos de bactérias distintos. A primeira fase é a produção e nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ) a partir de  $\text{NH}_4^+$ , por um grupo de bactérias, imediatamente seguida, ao que parece, pela sua oxidação por outra bactéria, para a forma de nitrato. As variações enzimáticas são representadas de maneira muito simples:

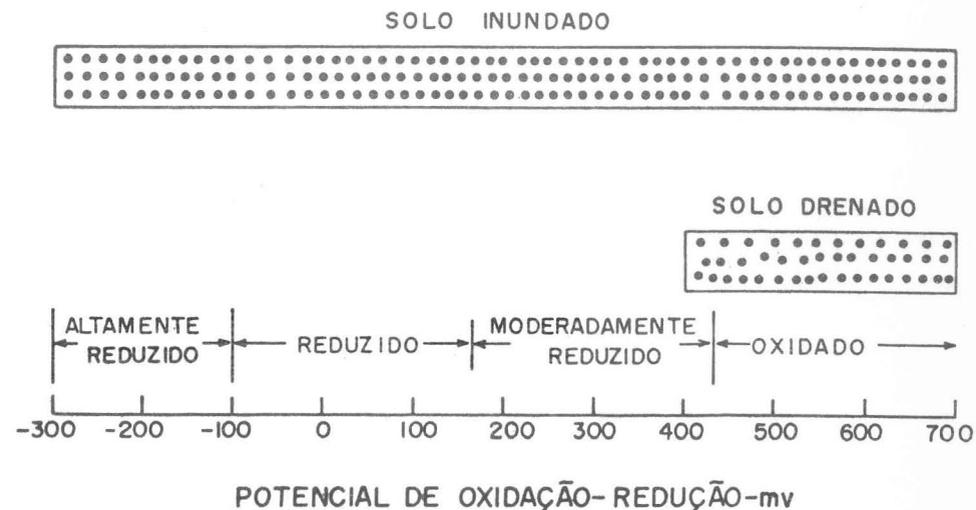
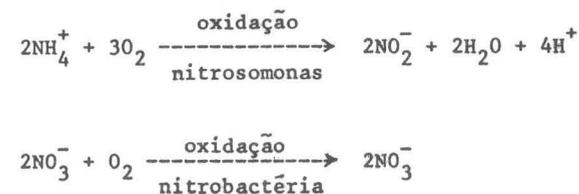


Fig. 3. Potencial de oxi-redução, em solo drenado e inundado (Adaptado de PATRICK & MAHAPATRA, 1968).



##### Desnitrificação

A desnitrificação consiste na transformação do íon nitrato em óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) e nitrogênio elementar ( $\text{N}_2$ ).

A nitrificação e a desnitrificação apresentam importância prática em solos inundados. São os principais mecanismos de perdas de nitrogênio em solos inundados, além da fixação de  $\text{NH}_4^+$  pelo solo (Fig. 4). Não é possível determinar as perdas de N por este processo, em condições naturais do solo, pois ainda não existe método apropriado. As perdas de N podem ser determinadas indiretamente pelo isótopo  $^{15}\text{N}$ .

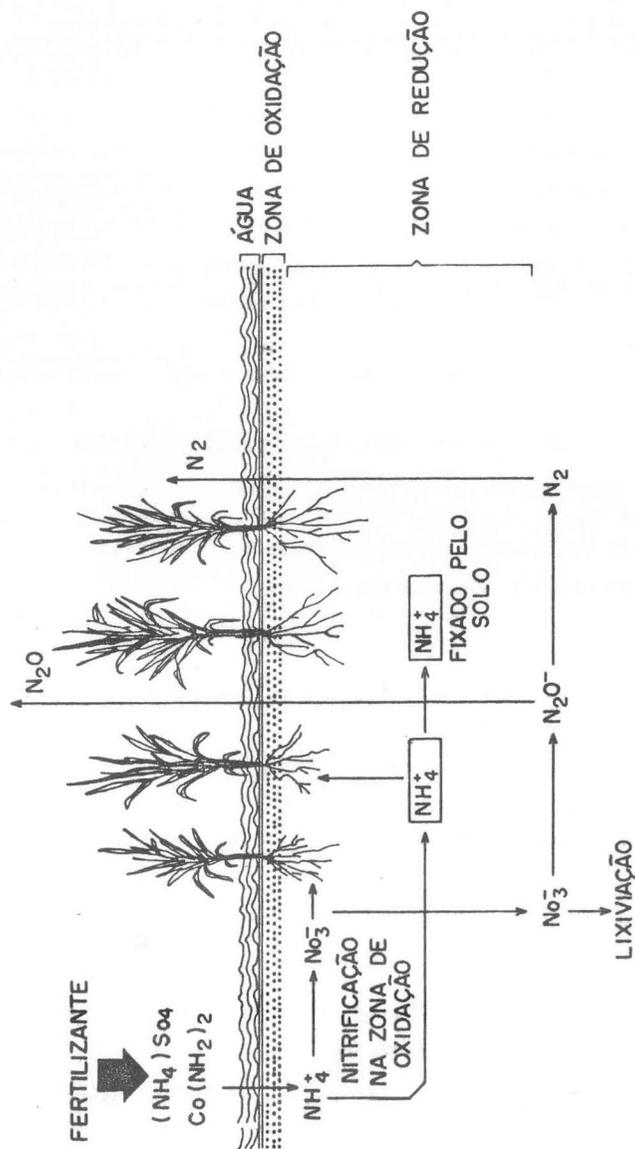
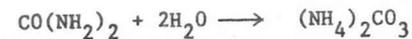


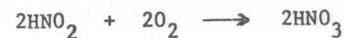
Fig. 4. Modificação de fertilizantes nitrogenados em solo inundados (Adaptada de FAGERIA, 1989)

#### Transformação de uréia em solos inundados

Depois de aplicada no solo, a uréia transforma-se em carbonato de amônio, pelo processo de hidrólise catalisado pela enzima urease:



Se existe oxigênio, o carbonato de amônio segue o processo de nitrificação, como apresentado abaixo:



Em caso de solo inundado, onde não existe oxigênio suficiente para o processo de nitrificação, a uréia sofre o processo de amonificação, como apresentado pela seguinte reação:



#### MANEJO EFICIENTE DE N EM SOLOS INUNDADOS

Os vários experimentos de resposta ao N mostram que a absorção de N aplicado na cultura de arroz nunca atinge mais que 30 a 40%. Utilizando melhor prática agrônômica, em condições controladas, pode-se chegar a 60 a 65% (De DATTA *et al.* 1968). A eficiência de N pode ser aumentada através das seguintes práticas em solos inundados;

1. Aplicação fonte correta
2. Incorporação de fertilizante na zona de redução
3. Aplicação na época correta
4. Uso de cultivares eficientes e com alto potencial de produtividade
5. Aplicação de quantidade correta de fertilizantes

6. Controle de invasoras

7. Controle de doenças e pragas

#### 4.4.2. Fósforo

Outra modificação importante, que ocorre nos solos inundados, é o aumento da disponibilidade do fósforo. Este aumento de disponibilidade de P não é igual para todos os solos. Com o tempo de inuncação, são obtidos maiores valores nos solos arenosos e calcários e com baixo teor de ferro; valores moderados, em solos arenosos e pobres em ferro; pequenos, em solos aproximadamente neutros e argilosos; e mínimo, em solos ácidos, com predominância de argila ferralítica (Fig. 5).

Em solos não calcários, o aumento da solubilidade do P está associada com a diminuição da condutividade elétrica e com o aumento da concentração de  $Fe^{2+}$ . O aumento da concentração de P solúvel em solos ácidos inundados se deve:

- à hidrólise de fosfatos de ferro e alumínio;
- à liberação do P nas posições de troca das argilas e óxidos hidratados de Fe e Al; e
- à redução do  $Fe^{3+}$  para  $Fe^{2+}$  com a consequente liberação do P ligado quimicamente a este óxido ( $Fe_2O_3$ ).

As duas primeiras reações ocorrem devido ao aumento de pH. Em solos alcalinos, o aumento da solubilidade do P é uma consequência da diminuição do pH destes solos, quando submersos, que provoca dissolução de apatitas.

Os íons fosfato, liberados por estas reações e pela decomposição da matéria orgânica, podem ser, em condições de submersão, adsorvidos pelas argilas e óxidos hidratados, de alumínio, ou podem movimentar-se por difusão, para locais oxidados a serem reprecipitados. Isto explica por que o aumento na concentração do P solúvel é menor e transitório em solos ácidos e argilosos, quando comparado aos solos calcários.

Em síntese, os principais fatores responsáveis pela maior disponibilidade do P nos solos inundados são, entre outros, o aumento do pH e, principalmente, a redução de fosfatos férricos na forma mais solúvel de fosfato ferroso.

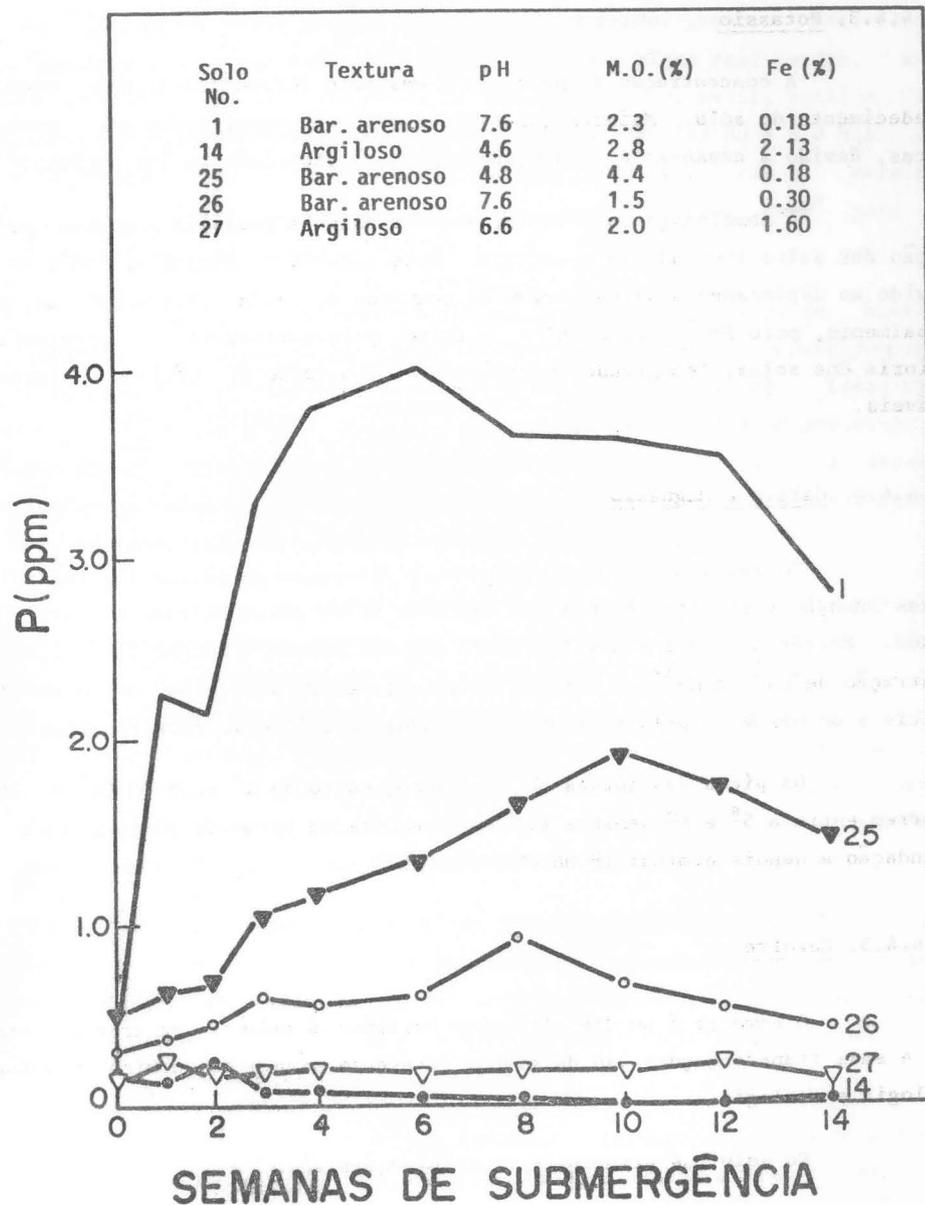


Fig. 5. Concentração fósforo na solução de cinco solos inundados (Adaptado de PONNAMPERUMA, 1972)

#### 4.4.3. Potássio

A concentração de potássio é bastante influenciada pela secagem e umedecimento do solo. Maiores quantidades de K são encontradas em condições secas, devido à expansão e, conseqüentemente, à liberação do íon potássio.

À semelhança do fósforo, a quantidade de potássio presente na solução dos solos inundados é aumentada. Este aumento na disponibilidade de K é devido ao deslocamento deste cátion do complexo de troca, para a solução, principalmente, pelo  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{NH}_4^+$  e  $\text{Mn}^{2+}$ . O ferro, pela quantidade que apresenta na maioria dos solos, tem grande importância na liberação dos cátions intercambiáveis.

#### 4.4.4. Cálcio e Magnésio

Do mesmo modo que o potássio, a liberação do cálcio e magnésio em solos inundados é bastante intensa, tanto em solos adubados como nos não adubados. Entretanto, nos solos adubados, segundo MORAES & FREIRE (1974), a concentração de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  na solução do solo é maior, devido ao deslocamento do cálcio e do magnésio pelo  $\text{K}^+$  e  $\text{NH}_4^+$ , aplicados no solo como fertilizantes.

Os picos das curvas de liberação, tanto do  $\text{K}^+$  como do  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$ , ocorrem entre a 5ª e 6ª semanas estabilizando-se em torno de 50 dias após a inundação e depois diminui (PONNAMPERUMA, 1977).

#### 4.4.5. Enxofre

O enxofre é um dos elementos bastante abundante na crosta terrestre e suas transformações são de grande interesse para a geoquímica, pedologia, biologia e ecologia.

No solo, as principais transformações são:

- a) a oxidação do enxofre elementar e enxofre orgânico a sulfatos;
- b) a redução do  $\text{SO}_4^{2-}$ .

Em ambiente anaeróbico, ocorrem a redução do sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) a sulfeto e o desdobramento dos aminoácidos (cistina, cisteína e metionina, derivados

da hidrólise da proteína) a  $\text{H}_2\text{S}$ , amônia, tióis e ácidos graxos. Metil-tiol tem sido encontrado em solos submersos. O mau odor das algas azul-verdes, encontradas em açudes, tem sido atribuído ao dimetil sulfeto, metil, butil e isobutil tiol. O principal produto da transformação anaeróbica do S é o  $\text{H}_2\text{S}$  derivado da redução do  $\text{SO}_4^{2-}$ . O  $\text{H}_2\text{S}$ , assim formado, pode reagir com os metais pesados, dando sulfetos insolúveis, e funcionar como fornecedor de  $\text{H}^+$  para as bactérias fotossintetizantes ou ser oxidado.

A redução do sulfeto é efetuada por um pequeno grupo de bactérias obrigatórias anaeróbicas pertencentes ao gênero *Desulfovibrio*, e *Desulfomaculum*, as quais usam  $\text{SO}_4^{2-}$  no processo respiratório (BLAIR *et al.* 1978). Essas bactérias usam o  $\text{H}^+$  e uma grande variedade de produtos fermentados no processo de redução do  $\text{SO}_4^{2-}$ ; elas toleram altas concentrações de sais e  $\text{H}_2\text{S}$  e se desenvolvem melhor na faixa de pH de 5,5 a 9,0. Baixas temperaturas e altas concentrações de nitrato, ferro e manganês, retardam a redução do  $\text{SO}_4^{2-}$ .

A dinâmica do sulfato solúvel em água (que é medido pela sua redução), em solos inundados, depende das propriedades do solo. Em solos neutros ou alcalinos, a concentração de  $\text{SO}_4^{2-}$  pode chegar a 1.500ppm e cair a zero, dentro de 6 semanas de submersão. Em solos ácidos, primeiro ocorre aumento de  $\text{SO}_4^{2-}$  solúvel, depois, um pequeno decréscimo e, em seguida, aumento por vários meses. O aumento inicial da concentração de  $\text{SO}_4^{2-}$  é atribuído à liberação de  $\text{SO}_4^{2-}$  fortemente absorvido, em pH baixo, pelas argilas e óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, devido ao aumento do pH provocado pelo alagamento.

Embora possam ser produzidas grandes quantidades de  $\text{H}_2\text{S}$  em solos submersos, sua concentração solúvel em água pode ser pequena e quimicamente quase não detectável. Este fato é devido a sua remoção como sulfetos insolúveis, principalmente  $\text{FeS}$ , motivo pelo qual os solos submersos raramente contêm mais do que 0,1ppm de  $\text{H}_2\text{S}$ .

A redução do sulfato pode permitir a formação de solos completamente opostos com relação à sua reação (pH). Sulfato de sódio presente em grande quantidade, nos solos salino-sódicos, pode ser convertido em  $\text{H}_2\text{S}$  e bicarbonato de sódio durante os períodos de inundação. Esta reação diminui a salinidade e aumenta a alcalinidade.

A redução do sulfato, em solos inundados, tem três implicações para a cultura do arroz:

- 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.

#### 4.4.6. Ferro

A mudança química mais importante, que ocorre quando um solo é submerso, é a redução do ferro trivalente ( $Fe^{3+}$ ) para ferro bivalente ( $Fe^{2+}$ ). Maior disponibilidade de ferro solúvel ( $Fe^{2+}$ ) é favorável para a planta de arroz, mas, em solos ácidos, sua concentração pode atingir nível tóxico para o arroz. A redução do ferro tem importantes consequências químicas (PONNAMPERUMA, 1972):

- a) - a concentração de ferro solúvel em água aumenta;
- b) - há um aumento do pH;
- c) - cátions são deslocados dos sítios de troca;
- d) - aumenta a solubilidade do fósforo e da sílica; e
- e) - novos minerais são formados.

A dinâmica de transformação do  $Fe^{2+}$  segue uma curva aproximadamente assintótica, conforme mostra a Fig. 6. De 5 a 50% dos óxidos de ferro livres, presentes no solo, podem ser reduzidos dentro de poucas semanas de submersão, dependendo da temperatura, do teor de matéria orgânica e do grau de cristalização dos óxidos. Quanto mais baixo for o grau de cristalização, maior será a percentagem de redução.

As propriedades do solo influenciam mais drasticamente a dinâmica do ferro solúvel em água do que o ferro total. Solos ácidos, ricos em matéria orgânica e ferro, atingem concentrações de até 600ppm, dentro de uma a três semanas de submersão (Fig. 6) e, em seguida, decrescem até o nível de 50 a 100ppm, que persiste por vários meses. Solos ricos em matéria orgânica, mas com baixo teor de ferro, proporcionam altas concentrações de ferro solúvel, que persiste por vários meses. Em solos neutros e calcários, a concentração de ferro solúvel raramente excede a 20ppm.

A toxidez de Fe foi descoberta nas Filipinas, no Japão e na Colômbia, e recebeu o nome de "doença de bronzeamento". No Brasil, esta toxidez de

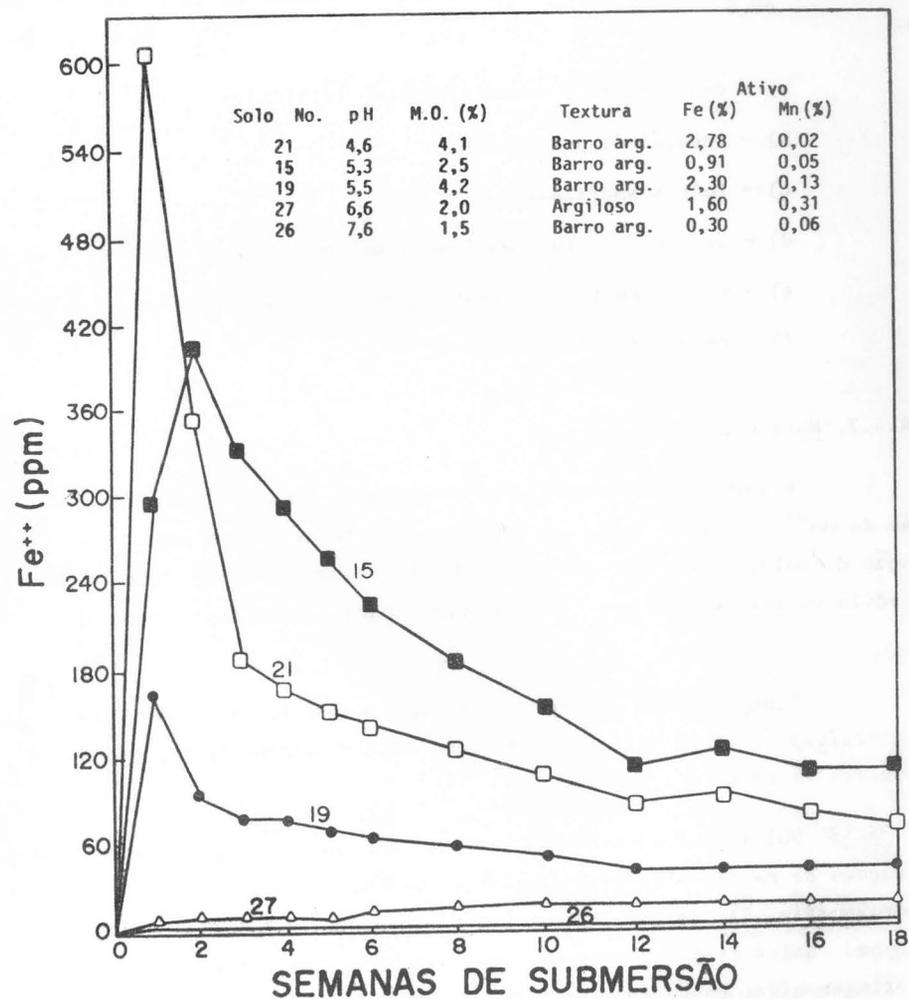


Fig. 6. Concentração de ferro na solução do solo durante o período de inundação (Adaptado de PONNAMPERUMA, 1976)

Fe foi suspeitada por pesquisadores dos Estados de Minas Gerais, Santa Catarina, Rio de Janeiro e Goiás (BARBOSA FILHO, 1987).

O grau ou capacidade de realização de reações de redução no solo tem influência sobre suas propriedades químicas, alterando a disponibilidade de nutrientes para as plantas. Os sintomas de toxidez de ferro são os seguintes:

- a) - crescimento e desenvolvimento retardados
- b) - redução do perfilhamento
- c) - folhas amareladas
- d) - secamento total das folhas em concentração muito alta de  $Fe^{2+}$
- e) - raízes curtas, grossas e pouco ramificadas e
- f) - raízes de cor vermelha.

#### 4.4.7. Manganês

A principal transformação do manganês em solos inundados são a redução do  $Mn^{4+}$  para  $Mn^{2+}$  com o conseqüente aumento deste íon solúvel em água na solução do solo, a precipitação do carbonato de manganês e a reoxidação do  $Mn^{2+}$ , difundido ou movimentado por fluxo de massa para a interface oxigenada do solo.

Dentro de uma a três semanas após a inundaçã, quase todo o manganês extraível por EDTA-ditionito presente nos solos é reduzido, exceto em solos pobres em matéria orgânica.

Solos ácidos, ricos em manganês e matéria orgânica, apresentam concentrações de manganês solúvel de até 90ppm, dentro de uma a duas semanas de submersão (Fig. 7), declinado, depois, rapidamente, e estabilizando em torno de 10ppm. Solos ricos em manganês, mas com baixo teor de matéria orgânica, também atingem altas concentrações. Mesmo quando submersos por longos períodos, os solos alcalinos e os pobres em manganês raramente apresentam concentrações de manganês solúvel acima de 10ppm.

Quando um solo é drenado, o ar penetra e reoxida tanto o ferro como o manganês; entretanto, o  $Fe^{2+}$  é mais facilmente oxidado do que o  $Mn^{2+}$  e é

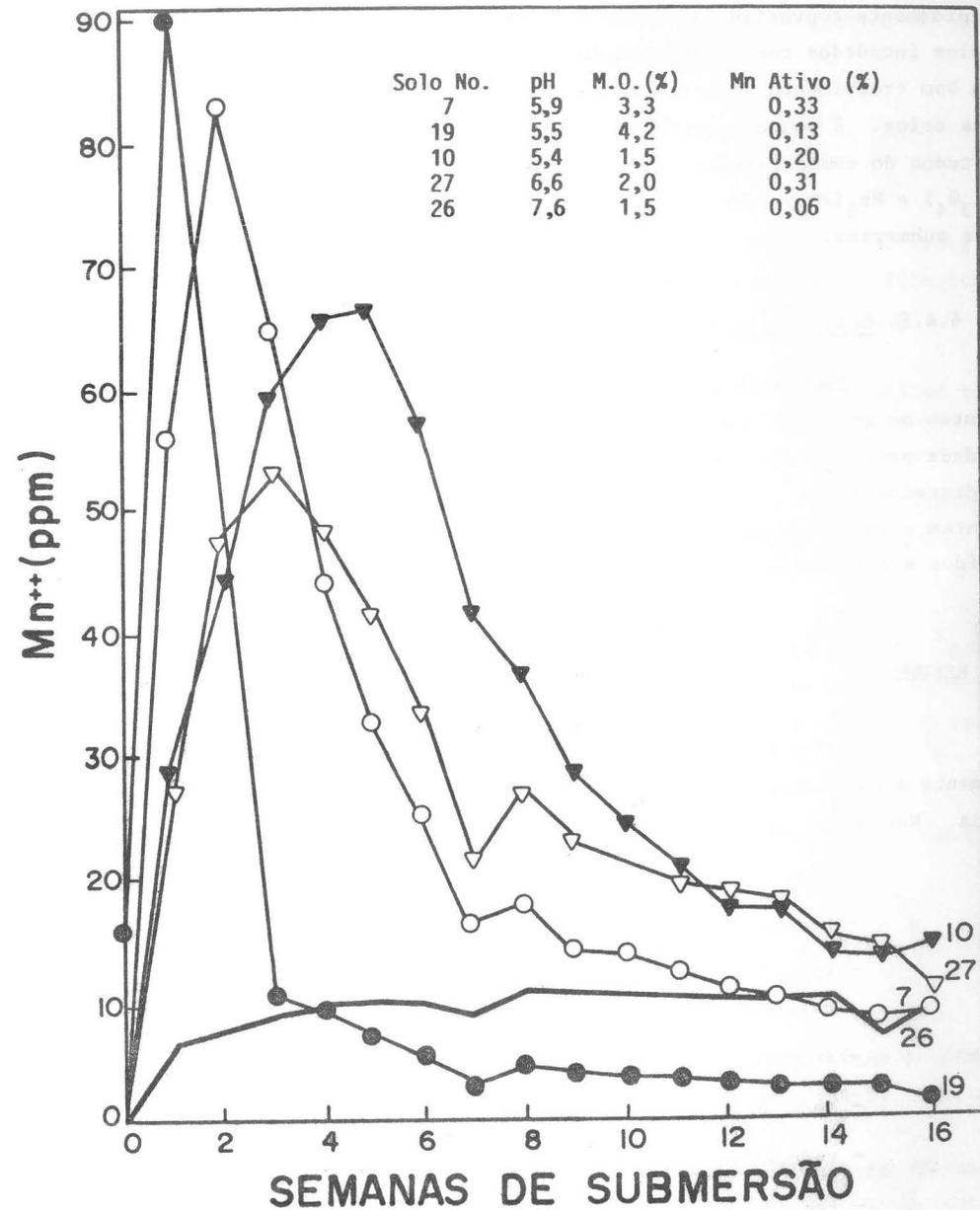


Fig. 7. Concentraçã de manganês na soluçã de cinco solos durante o período de inundaçã (Adaptada de PONNAMPERUMA, 1977a)

rapidamente convertido a óxidos hidratados de ferro trivalente. A maioria dos solos inundados contém quantidade de Mn solúvel em água ( $Mn^{2+}$ ) suficiente para um bom crescimento do arroz e, normalmente, não ocorre toxidez de manganês nestes solos. É pouco conhecida a mineralogia do manganês em solos submersos. Estudos do comportamento da precipitação de  $MnCO_3$ ,  $(Ca, Fe, Mn)CO_3$ ,  $MnS$ ,  $(Mn_3O_4, Fe_3O_4)$  e  $Mn_3(PO_4)_2$  são de grande valor para o conhecimento da química dos solos submersos.

#### 4.4.8. Outros micronutrientes

Embora as formas de boro, cobalto, cobre, molibdênio e zinco, presentes no solo, não estejam envolvidas nas reações de oxirredução, sua mobilidade pode ser afetada quando o solo é inundado. Assim, a redução dos óxidos hidratados de  $Fe^{3+}$  e  $Mn^{4+}$  e a produção de compostos orgânicos complexantes aumentam a solubilidade do Co, Cu e Zn, enquanto que o aumento do pH de solos ácidos e a formação de sulfetos abaixam suas solubilidades.

#### 5. RESUMO

Com a inundação ou submersão, a propriedade dos solos muda drasticamente e em consequência desta mudança, disponibilidade de nutrientes também muda. Nos solos inundados são mais importantes as seguintes transformações:

- diminuição do oxigênio molecular;
- redução do solo ou diminuição do potencial de redução;
- aumento do pH de solos ácidos e diminuição no caso de solos alcalinos;
- aumento da condutividade elétrica da solução do solo;
- redução de  $Fe^{3+}$  para  $Fe^{2+}$  e  $Mn^{4+}$  para  $Mn^{2+}$ ;
- redução de  $NO_3^-$  e  $NO_2^-$  para  $N_2$  e  $N_2O$ ;
- redução de  $SO_4^{2-}$  para  $S^{2-}$ ;
- aumento de concentrações e disponibilidade de N, P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Mo e Si;
- diminuição da concentração e da disponibilidade de Zn, Cu e S.

- poucas informações disponíveis sobre redução de sulfato e sobre a química de solos de várzea do Brasil.

#### 6. REFERÊNCIAS

- BARBOSA FILHO, M.P. 1987. Nutrição e adubação arroz: sequeiro e irrigado. Associação Brasileira para pesquisa do Potássio e do Fósforo, Piracicaba, Boletim Técnico, 9.
- BLAIR, G.J.; MANUEL, C. & MONVAT, G. 1978. Sulfur nutrition of wetland rice. IRRI, Los Baños, IRRI Research paper series, 21.
- De DATTA, S.K.; MAGNAYE, C.P. & MOOMAE, J.C. Efficiency of fertilizer nitrogen ( $^{15}N$ -Labeled) for flooded soil. p.67-76. In: International Congress of Soil Science, 9, Transactions v.4. Adelaide, Austrália.
- EMBRAPA-Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos, 1980. Estudo expedido de solos do Estado do Rio Grande do Sul e parte de Santa Catarina, para fins de classificação, correlação e legenda preliminar. Rio de Janeiro, Boletim Técnico 17.
- FAGERIA, N.K. 1984. Adubação e nutrição mineral da cultura de arroz. EMBRAPA-CNPAP/Editora Campus, Rio de Janeiro.
- FAGERIA, N.K. 1989. Solos tropicais e aspectos fisiológicos das culturas. EMBRAPA-CNPAP, Brasília, DF.
- FREIRE, F.M. & NOVAES, R.F. 1980. Solos de Várzeas; características e problemas relativos à fertilidade. Int.Agropec. Belo Horizonte, 6:24-34.
- LAMSTER, E.C. 1980. Programa Nacional de Aproveitamento racional de Várzeas - Provárzeas Nacional. Int.Agropec., Belo Horizonte 6:3-8.
- MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, BRASIL. 1982. Relatório Anual, Brasília, DF.
- MORAES, J.F.V. 1984. I Curso de Produção de arroz. EMBRAPA-CNPAP, 09 a 27 de

janeiro de 1984. Goiânia, GO.

- MORAES, J.F.V. & FREIRE, C.J.S. 1974. Variação de pH, da condutividade elétrica e da disponibilidade dos nutrientes nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio e magnésio em quatro solos submetidos a inundação. *Pesq. agropec. bras. Agron.* 9:35-43.
- NETO, M. & MACEDO, J. 1981. Contribuição para interpretação dos levantamentos de solos. *EMBRAPA-CPAC, Planaltina, Boletim de Pesquisa*, 6.
- PATRICK, W.H. & MAHAPATRA, I.C. 1968. Transformation and availability to rice of nitrogen and phosphorus in water logged soil. *Adv.Agron.* 20:323-359.
- PONNAMPERUMA, F.N. 1972. The chemistry of submerged soils. *Adv. Agron.* 24: 29-96.
- PONNAMPERUMA, F.N. 1976. Specific soil chemical characteristics for rice production in Asia. *IRRI Research paper series number 2*, Los Baños, Philippines.
- PONNAMPERUMA, F.N. 1977a. Behavior of minor elements in Paddy soils. *IRRI. Research paper series number 8*, Los Baños, Philippines.
- PONNAMPERUMA, F.N. 1976b. Screening rice for tolerance to mineral Stresses. *IRRI Research paper number, 6*, Los Baños, Philippines.
- RASSINI, J.B.; REIS, A.E.G.; MACEDO, J. & LEITE, J.C. 1984. Caracterização de várzeas na região dos Cerrados. *EMBRAPA-CPAC, Boletim de Pesquisa* 22, Planaltina, DF.