

DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO EM SEIS SOLOS DO URUGUAI AFETADA PELA VARIAÇÃO TEMPORAL DAS CONDIÇÕES DE OXIRREDUÇÃO⁽¹⁾

J. HERNÁNDEZ⁽²⁾ & E. J. MEURER⁽³⁾

RESUMO

Os processos de oxirredução influem na reatividade dos óxidos de ferro no solo, o que pode afetar a disponibilidade do fósforo. Com o objetivo de avaliar como estes processos interferem na disponibilidade do fósforo, realizou-se um estudo com seis solos do Uruguai sujeitos a variações temporais nas condições de oxirredução. Amostras do horizonte A desses solos, com diferente material de origem e que ocupam posição topográfica plana e encostas baixas da paisagem, foram colocadas sob condições de alagamento por 5, 15 e 45 dias. Decorridos estes períodos de tempo, os materiais de solo foram secos durante um período de 21 dias e amostrados para análises químicas. As formas de ferro de baixa cristalinidade, extraídas pelo oxalato de amônio a pH 6 (Fe_6), aumentaram com o alagamento dos solos e, após a secagem, decresceram, mas ficaram, entretanto, acima dos teores iniciais. Encontrou-se uma relação significativa entre o conteúdo de carbono orgânico dos solos e a proporção de formas de ferro de baixa cristalinidade, antes e depois dos diferentes períodos de alagamento. Os teores de fósforo disponível extraídos por Bray-1 aumentaram com o alagamento e, com exceção do solo Algorta, após a secagem dos solos, diminuíram para valores similares aos iniciais. O alagamento do solo e a posterior secagem determinaram o aumento das frações de ferro de maior reatividade, acarretando a adsorção de fósforo, evidenciado pelos menores teores de fósforo remanescentes na solução. Houve tendência muito definida de diminuição do fósforo na solução dos solos com o aumento dos teores de ferro em formas de alta reatividade química (Fe_6). Estes resultados indicam que, após ciclos de alagamento-secagem do solo, a adsorção do fósforo aumenta pela reação com compostos de ferro recentemente precipitados, o que resulta em menor disponibilidade do fósforo para as plantas.

Termos de indexação: fósforo disponível, adsorção de fósforo, óxidos de ferro, alagamento-drenagem, oxidação-redução.

⁽¹⁾ Parte da Tese de Mestrado apresentada pelo primeiro autor ao Curso de Pós-Graduação em Ciência de Solo, Faculdade de Agronomia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre (RS). Recebido para publicação em maio de 1999 e aprovado em novembro de 1999.

⁽²⁾ Professor Adjunto da Facultad de Agronomía, Universidad de la República, CP 11900. Montevideo, Uruguay.

⁽³⁾ Professor Adjunto do Departamento de Solos da Faculdade de Agronomia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). CEP 90001-970 Porto Alegre (RS). E-mail: emeurer@conex.com.br. Bolsista do CNPq.

SUMMARY: *PHOSPHORUS AVAILABILITY IN SIX URUGUAYAN SOILS AFFECTED BY ALTERNATION OF THE FLOODED-DRAINED CONDITIONS*

Redox processes affect the reactivity of iron oxides and this can affect the P availability in soils. To evaluate how this processes can affect phosphorus availability, this study was carried out with six Uruguayan soils, which differed in their parent material, and subjected to alternation of the flooded-drained conditions. Soil samples (0-15 cm) of the A horizon, were flooded during 0, 5, 15 and 45 days, drained and sampled after 21 days of air-drying. Fe extracted by ammonium oxalate at pH 6 (Fe_o) increased with flooding, and after re-oxidation, decreased to levels greater than the initial levels. The organic carbon content of the soils was correlated with the poorly crystalline forms of Fe before and after flooding. Phosphorus availability (Bray-1) increased during the flooding period, and, except for Algorta soil, decreased during the drying period even lower than at the initial measurements. The alternation of the flooded-drained conditions increased the iron content in high reactivity forms resulting in increasing phosphorus adsorption, as indicated by low levels of P in the soil solution. A relationship between the iron content in high reactivity forms (extracted by ammonium oxalate at pH 6) and the adsorption of P resulting from a decreased P solution was found. These results suggest that after flooded-drained conditions, P availability to plants decreases due to the absorption of P with recently precipitated high reactivity forms of iron oxides.

Index terms: phosphorus availability, phosphorus adsorption, iron oxides, flooding-drained soils, oxidation-reduction conditions.

INTRODUÇÃO

As variações temporais no teor de água do solo condicionadas pelo regime pluviométrico e pelas dificuldades impostas à drenagem do perfil podem provocar alterações nas condições de oxirredução do solo (Ponnamperuma, 1972). Estes processos determinam modificações na mineralogia dos óxidos de ferro, assim como na sua capacidade de reagir com o fósforo (Savant & Ellis Jr., 1964; Willett & Higgins, 1980; Bradley et al., 1984). A magnitude das reações dos óxidos de ferro com o fósforo depende dos seus teores totais no solo e da quantidade presente em formas de baixa cristalinidade. Períodos alternados de oxidação-redução aumentam a fração de óxidos de ferro finamente divididos de baixa cristalinidade (Blume, 1988) e estas formas influem na disponibilidade do fósforo em condições de alagamento (Shahandeh Jr. et al., 1994).

O alagamento do solo pode resultar num aumento da disponibilidade do fósforo, em virtude da redução do ferro e do aumento da solubilidade dos compostos com o fósforo (Aguirre & Ríos, 1984; Roy & De Datta, 1985; Willett, 1989). Velloso et al. (1993) observaram, porém, um aumento no fósforo disponível até a segunda semana do alagamento, ocorrendo, após, um decréscimo acentuado nos teores, que ficaram próximos ou inferiores aos iniciais.

O processo de reoxidação do solo diminui a disponibilidade do fósforo, em decorrência da

readsorção da fração solubilizada, durante o período de redução, nas superfícies altamente reativas de óxidos de ferro recentemente precipitados (Patrick Jr. & Mikkelsen, 1971; Brandon & Mikkelsen, 1979; Bradley et al, 1984). A importância destes processos que afetam a disponibilidade do fósforo para culturas, como a do arroz irrigado, por exemplo, tem sido mencionada por diferentes autores. Estudos realizados no Uruguai apresentam evidências da importância do processo, também, em solos sujeitos a períodos curtos de anaerobiose sob pastagens (Ferrando & Mercado, 1997). Entretanto, os mecanismos envolvidos nestes processos e a velocidade com que eles afetam a disponibilidade do fósforo não têm sido adequadamente avaliados e quantificados.

O objetivo deste trabalho foi caracterizar as variações na disponibilidade e na adsorção do fósforo em seis solos do Uruguai, decorrentes das alterações temporárias das formas de ferro devidas à alternância das condições de oxirredução.

MATERIAL E MÉTODOS

Foram selecionados seis solos do Uruguai, considerando os seguintes critérios: (a) posição topográfica plana e encostas baixas da paisagem, sujeitas a variações temporais nas condições de oxirredução; (b) importância na produção de

pastagens e ou sistemas mistos de rotações pastagem e arroz e (c) diferente material de origem. No quadro 1, estão apresentadas algumas características químicas e físicas do horizonte A desses solos. Dados complementares foram apresentados por Hernández & Meurer (1998). Amostras coletadas na camada superficial (0-15 cm de profundidade) dos solos foram secas ao ar, moídas e peneiradas (malhas de 2 mm de diâmetro). Em copos plásticos, foram colocados 40,0 g de cada amostra dos solos, adicionando-se água até formar uma lâmina de água livre de aproximadamente 4 mm, que foi mantida, por reposição periódica, durante os períodos em que os solos foram submetidos aos tratamentos de alagamento. Os copos foram dispostos numa bancada em laboratório, sob condições controladas de temperatura (entre 23 e 27°C), e foram cobertos com um filme de polietileno preto, num anteparo a 30 cm de altura, para evitar o crescimento de algas, mas sem impedir a troca de gases com o ar atmosférico. Os tratamentos constituíram-se de três períodos de alagamento, 5, 15 e 45 dias, programados de forma a serem encerrados todos no mesmo dia. Após o término dos períodos de alagamento, os solos foram secos ao ar, durante um período de 21 dias, sob temperatura ambiente.

O delineamento utilizado foi o de parcelas ao acaso, com três repetições. A unidade experimental foi composta por uma combinação entre solo, período de alagamento. Ao fim dos períodos de alagamento e ao término da secagem, foram realizadas as seguintes determinações em subamostras de cada solo: (a) formas de ferro e de fósforo extraídos por Bray-1 no fim dos períodos de alagamento; (b) fósforo extraível por Bray-1; (c) formas de ferro após 21 dias de secagem e (d) pH em água durante o tempo do ensaio. A coleta das amostras de solos para as determinações químicas e do pH foi feita na camada inferior e interna dos copos plásticos, após separação e descarte da camada superficial do solo (4 mm). As amostras foram secas ao ar, moídas e peneiradas (malhas de 2 mm de diâmetro). As determinações químicas realizadas foram as seguintes: fósforo disponível, pelo método Bray-1 (Bray & Kurtz, 1945); carbono orgânico, pelo método de Walkley-Black (Nelson & Sommers, 1982); pH em água, pelo método potenciométrico, com uma relação solo:solução de 1:2,5 (vol/vol) (Universidad, 1980); textura, pelo método de Bouyoucus (Forsythe, 1975).

Caracterização das frações de ferro - foram usados os seguintes métodos e extratores: (a) ferro total extraído pelo ditionito de sódio (Fe_d), avaliado pela técnica proposta por Kilmer (1960), modificada e descrita em Cayssials & Puentes (1974): duplicatas de 1,25 g de solo foram colocadas em tubos de centrífuga de 50 mL, junto com 1,25 g de ditionito de sódio e 25 mL de água deionizada, e agitada durante 16 h. A suspensão foi diluída até 60 mL com água destilada, ajustando-se o pH na faixa de 3,5-4,0, sendo, posteriormente, filtrada e diluída até

100 mL, determinando-se nela o teor de ferro; (b) ferro extraído pelo oxalato de amônio 0,2 mol L⁻¹ a pH 3 (Fe_3), avaliado pela técnica ajustada por Schwertmann (1973) e descrita em Tedesco et al. (1985). As amostras dos solos foram agitadas na ausência de luz com oxalato de amônio 0,2 mol L⁻¹ por duas horas, sendo as suspensões, posteriormente, centrifugadas, determinando-se o teor ferro na solução, e (c) ferro extraído pelo oxalato de amônio 0,2 mol L⁻¹ a pH 6 (Fe_6). Esta técnica difere da anterior apenas no valor do pH da solução extratora. O ferro contido nos extratos foi determinado por espectrofotometria de absorção atômica.

Avaliação da adsorção de fósforo - em tubos de centrífuga de 50 mL, equilibraram-se duplicatas de 2,5 g de solo com 25 mL de uma solução de $CaCl_2$ 0,01 mol L⁻¹, contendo fósforo em quantidade equivalente à dose de 600 mg kg⁻¹, adicionado como $Ca(H_2PO_4)_2$. Foram adicionadas duas gotas de tolueno para inibir a flora microbiana. As amostras dos solos foram equilibradas com a solução durante 18 h a 25°C num agitador recíproco (100 ciclos/min), centrifugadas e, posteriormente, filtradas. O teor de fósforo na solução foi determinado pelo método da redução seletiva com cloreto de estanho, depois da adição de molibdato de amônio. O fósforo adsorvido pela fase sólida foi calculado por diferença entre o fósforo adicionado e aquele quantificado na solução de equilíbrio, depois de prévia correção do fósforo inicialmente presente na solução. O índice P_{600} representa a percentagem do fósforo adsorvido pelo solo após a adição da dose equivalente a 600 mg kg⁻¹ de P.

Nos dados obtidos, realizaram-se análises de variância e contrastes ortogonais, análises de regressão e de correlação, utilizando os procedimentos PROC GLM, PROC REG e PROC CORR (SAS Institute, 1985).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Algumas características dos seis solos estudados neste trabalho e os teores de ferro extraídos pelo ditionito de sódio (Fe_d), pelo oxalato de amônio 0,2 mol L⁻¹ a pH 3 (Fe_3) e pelo oxalato de amônio 0,2 mol L⁻¹ a pH 6 (Fe_6), são apresentados no quadro 1.

A fração de ferro extraída pelo oxalato de amônio 0,2 mol L⁻¹ a pH 6 (Fe_6) foi avaliada no final dos diferentes períodos de alagamento e no final do período de secagem, em relação à testemunha (amostra original). Neste sentido, as análises da variância e os contrastes ortogonais foram realizados em conjunto, para cada solo, testando-se, principalmente, as hipóteses: (1) há diferença entre os teores iniciais e os correspondentes aos períodos de alagamento e secagem dos solos, (2) há diferença

Quadro 1. Características químicas e físicas das amostras superficiais dos seis solos estudados

Solo	P-Bray	Argila	C.O.	pH	CTC	Fe _d	Fe _s	Fe _e
	mg kg ⁻¹	g kg ⁻¹			cmol. kg ⁻¹		mg kg ⁻¹	
Tipic Hapludert Itapebi	8	460	34	5,7	32	8.592	6.235	1.642
Tipic Argiudoll Algorta	14	100	7	5,2	4	1.598	837	242
Albic Natraqualf La Charqueada	22	259	17	5,4	12	2.955	1.732	792
Tipic Argiudoll Alférez	5	179	18	5,4	11	4.490	2.908	508
Tipic Argiudoll Arroyo Blanco	7	219	24	5,4	16	2.957	2.308	417
Tipic Albaquoll Kiyú	15	308	18	5,4	15	5.653	3.633	758

entre os teores medidos durante o alagamento com os correspondentes à amostra seca após o alagamento e (3) há diferenças nos teores de ferro de acordo com o tempo de alagamento.

Os períodos de alagamento determinaram aumentos significativos ($P < 0,01$) para a fração de ferro extraída pelo oxalato de amônio $0,2 \text{ mol L}^{-1}$ a pH 6,0 (Fe_6) nas seis amostras estudadas (Quadro 2). Os solos Arroyo Blanco e Alférez apresentaram os maiores incrementos desta fração com cinco dias de alagamento (na ordem de 200 e 300%, respectivamente), enquanto, nos demais, os aumentos foram progressivos. Os aumentos expressivos da fração Fe_6 com cinco dias de alagamento nestes dois solos foram acompanhados por um aumento mais rápido do pH, o que estaria evidenciando maior velocidade do processo de redução (Figura 1). O aumento do pH em solos ácidos após alagamento é dependente das quantidades de ferro reduzível e do teor da matéria orgânica (Yamane, 1978).

Encontraram-se correlações significativas entre o teor de carbono orgânico dos solos e os teores de ferro nas frações Fe_6 , Fe_3 e para a relação Fe_3/Fe_d (Quadro 3). Estas relações já foram observadas em trabalhos anteriores por Cayssials & Puentes (1974) e Schwertmann & Taylor (1989), que indicaram que altos teores e, ou, proporções de ferro sob formas de baixa cristalinidade estão associados com altos teores de carbono orgânico e, ou, alternância de períodos de oxidação-redução, que determinam condições desfavoráveis para a cristalização dos compostos com o ferro. As correlações entre os teores de carbono orgânico e o Fe_6 extraído aos 5, 15 e 45 dias de alagamento também foram significativas (Quadro 3),

o que evidencia uma dependência entre a solubilização do ferro pela microbiota (sob anaerobiose) e a fonte de energia para o metabolismo microbiano. As correlações entre o ferro extraído pelo oxalato a pH 6 e a proporção de formas de baixa cristalinidade (relação Fe_3/Fe_d) foram também significativas para o período de cinco dias de alagamento. Munch et al. (1978), avaliando as modificações na relação Fe_3/Fe_d , resultantes da redução dos solos, encontraram correlação significativa entre o Fe^{2+} no final do período de redução e o Fe_3 no solo antes do processo. Van Breemen (1988a,b) atribuiu a menor formação de óxidos de ferro estáveis à redução de formas estáveis até hidróxidos de Fe^{2+} , que podem ser transformados rapidamente em formas metaestáveis de Fe^{3+} .

Após o período de secagem dos solos (21 dias), com exceção do solo Algorta, os teores de Fe_6 diminuíram em todos os solos, independentemente do período de alagamento prévio (Quadro 2), mas ficaram, entretanto, superiores aos teores da amostra de solo que não esteve sujeito a alagamento. Isto pode indicar que, após o período de alagamento, pode ocorrer um aumento das formas de ferro de alta reatividade. Este comportamento também foi observado por Willett & Higgins (1978), que comprovaram que, após a drenagem (oxidação) do solo, o teor de ferro extraído pelo oxalato foi maior do que os teores iniciais quantificados antes do processo de alagamento (redução). Os óxidos de ferro recentemente oxidados são mais facilmente extraídos pelo oxalato, o que, segundo estes autores, indica uma diminuição na cristalinidade e aumento

Quadro 2. Aumentos percentuais do ferro extraído pelo oxalato de amônio 0,2 mol L⁻¹ a pH 6 (Fe₆) no final de cada período de alagamento e após 21 dias de secagem ao ar, em temperatura ambiente, em relação ao teor inicial da amostra original (sem alagar)

Tratamento	Solo	Typic Haplubert Itapebi	Typic Argiudoll Algorta	Albic Natraqualf La Charqueada	Typic Argiudoll Alférez	Typic Argiudoll Arroyo Blanco	Typic Albaquoll Kiyú		
								%	
5 dias de alagamento		12	8	74	231	304	74		
após secagem de 21 dias		1	55	44	149	166	44		
10 dias de alagamento		50	42	84	323	340	122		
após secagem de 21 dias		11	93	38	174	192	82		
15 dias de alagamento		45	104	99	331	365	183		
após secagem de 21 dias		29	114	42	190	198	108		

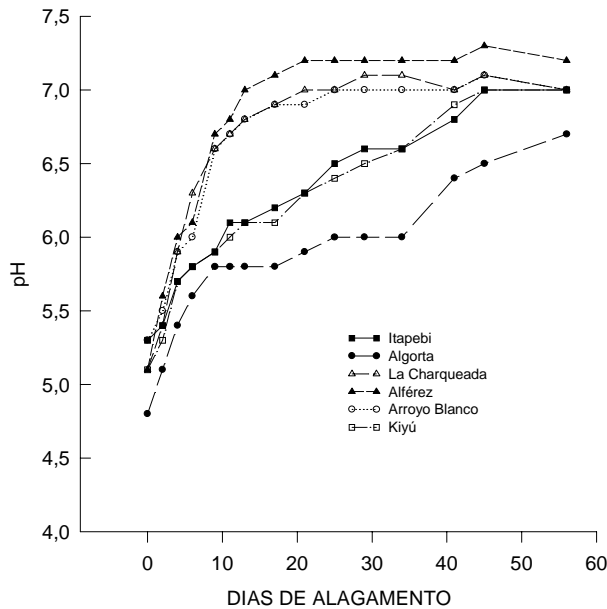


Figura 1. Evolução do pH em água dos seis solos durante o alagamento.

da sua reatividade. O comportamento diferenciado do solo Algorta, que apresentou as menores mudanças na fração Fe₆ e no pH, pode estar relacionado com os seus menores teores de ferro nas diferentes frações, além do baixo teor de matéria orgânica.

Fósforo disponível - os teores de fósforo extraído pelo Bray-1, após os diferentes períodos de alagamento, para os seis solos, são apresentados na figura 2. Com exceção do solo Algorta, nos demais solos, os teores de fósforo aumentaram significativamente ($P < 0,01$) com o tempo de alagamento em

Quadro 3. Coeficientes de correlação e sua probabilidade de significância para as relações entre o teor de carbono orgânico dos solos e da razão Fe₃/Fe_d (Fe_d = ferro extraído por ditionito) e os teores de ferro extraídos por oxalato de amônio a pH 3 (Fe₃), a pH 6 (Fe₆), para as amostras dos solos submetidas a 5, 15 e 45 dias de alagamento

Variável	C orgânico		Razão Fe ₃ /Fe _d	
	r	Probabilidade	r	Probabilidade
Fe ₃	0,756	0,024		
Fe ₆	0,672	0,046		
Fe ₃ /Fe _d	0,710	0,035		
Fe ₆ (5 dias)	0,743	0,027	0,687	0,042
Fe ₆ (15 dias)	0,788	0,018	0,628	0,060
Fe ₆ (45 dias)	0,655	0,048	0,573	0,082

relação à testemunha (amostra original), tendo o solo La Charqueada apresentado os maiores acréscimos com o alagamento. Nos demais solos, os aumentos dos teores do fósforo foram mais dependentes do tempo de alagamento. Este comportamento pode ser relacionado com a proporção de ferro em formas de alta reatividade no solo. No solo La Charqueada, a quarta parte do ferro extraído pelo ditionito (Fe_d) na amostra não submetida ao alagamento encontrava-se em compostos de alta reatividade química extraídos pelo oxalato de amônio a pH 6. O solo Algorta, ao contrário, apresentou menor proporção de Fe₆, além de menores teores absolutos, e as mudanças no teor do fósforo disponível não

foram significativas estatisticamente. No solo Itapebi, as mudanças na disponibilidade do fósforo aconteceram principalmente nos maiores períodos de alagamento. Esses resultados concordam com os obtidos por diversos autores (Savant & Ellis Jr., 1964; Roy & De Datta, 1985; Willett, 1989; Velloso et al., 1993). De Datta et al. (1966) observaram que o alagamento do solo por longos períodos aumentava o teor de fósforo disponível de 2,5 até 15 vezes em relação ao teor em solo não alagado. Eles interpretaram este aumento mais pela redução dos compostos de ferro que pelo aumento no pH, como foi referenciado por outros autores (Patrick Jr. & Mikkelsen, 1971).

Após o período de secagem dos solos (21 dias), os teores de fósforo extraível com Bray-1 diminuíram significativamente ($P < 0,01$) em todos os solos, com exceção do solo Algorta (Figura 3), em relação aos teores extraídos ao final dos períodos de alagamento (Figura 2), ficando com valores não estatisticamente diferentes dos quantificados nas amostras originais não submetidas ao alagamento. Esse comportamento pode indicar que, independentemente do período que estiveram submetidos ao alagamento, os teores do fósforo extraído dos solos, após a secagem, voltam aos seus níveis iniciais ou próximos deles. A redução acentuada do fósforo extraível após a secagem dos solos pode ser interpretada como uma readsorção do fósforo nas superfícies de alta reatividade química dos óxidos de ferro recentemente precipitados após o período de alagamento.

Adsorção de fósforo

Após o período de secagem (21 dias), coletaram-se amostras dos solos, das amostras originais e das que foram submetidas aos três períodos de alagamento, para estudar a adsorção de fósforo. Na figura 4, vêem-se os teores de fósforo na solução dessas amostras após equilíbrio com uma solução com fósforo na concentração equivalente à dose de 600 mg kg^{-1} de P. Em todos os solos, os teores de fósforo na solução foram significativamente inferiores ($P < 0,01$) aos da amostra original. Isto indica que, após os períodos de alagamento e de secagem dos solos, ocorreu maior adsorção do fósforo, evidenciado pelos menores teores de fósforo remanescentes na solução de equilíbrio. Atribui-se a maior adsorção do fósforo ao aumento das formas de ferro de alta reatividade, como visto e discutido anteriormente (Quadro 2). As mudanças mais acentuadas aconteceram nos solos La Charqueada, Alférez, Arroyo Blanco e Kiyú, o que pode estar relacionado com os altos teores de ferro extraído pelo oxalato de amônio a pH 6 durante o período de alagamento.

Por outro lado, cinco dias de alagamento tiveram um efeito similar na adsorção de fósforo que períodos mais longos, o que está associado com os aumentos nos níveis de Fe_6 nesse período. O comportamento observado evidencia a importância do aumento das superfícies de óxidos de ferro altamente reativas no processo de adsorção de fósforo pelos solos. Segundo

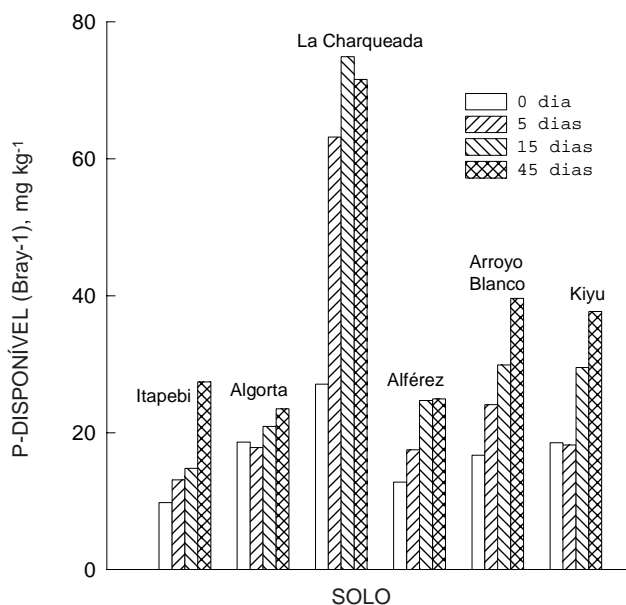


Figura 2. Teores de fósforo disponível por Bray-1 nos seis solos, nas amostras originais e após serem submetidas aos períodos de alagamento.

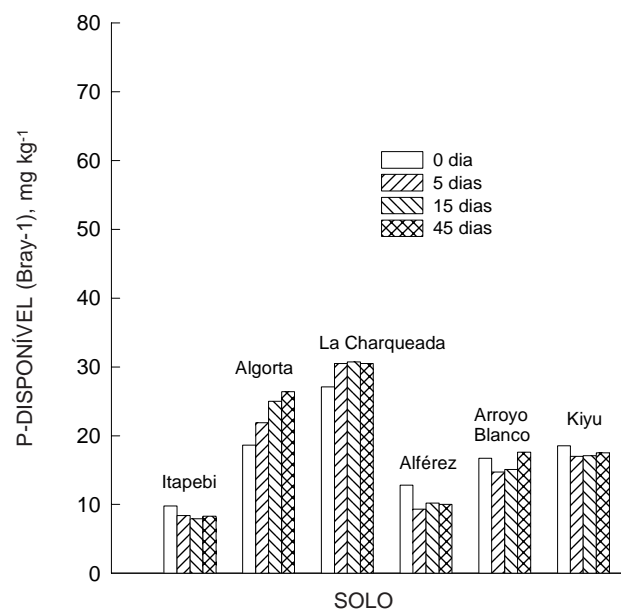


Figura 3. Teores de fósforo disponível por Bray-1 nos seis solos, nas amostras originais e após serem submetidas aos períodos de alagamento e de secagem por 21 dias.

Sah et al. (1989), períodos tão curtos como dois a quatro dias de alagamento podem causar um aumento da adsorção de fósforo, dependendo da

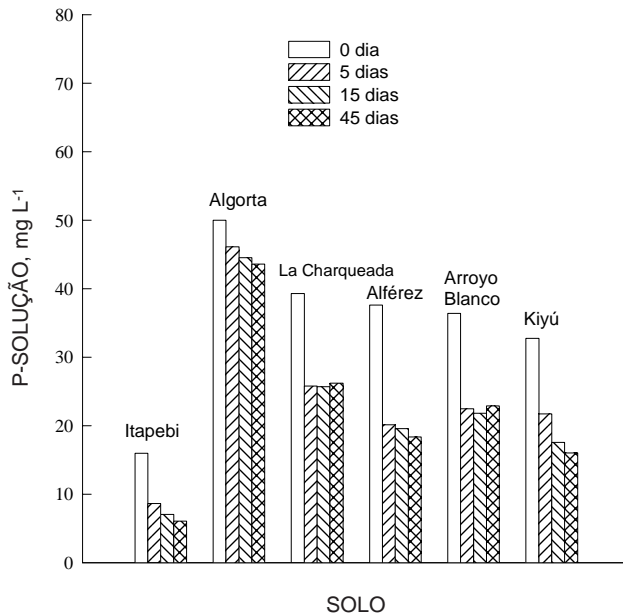


Figura 4. Teores de P na solução dos seis solos, após a adição de uma quantidade equivalente a dose de 600 mg kg^{-1} de P às amostras originais e às que foram submetidas aos períodos de alagamento e de secagem por 21 dias.

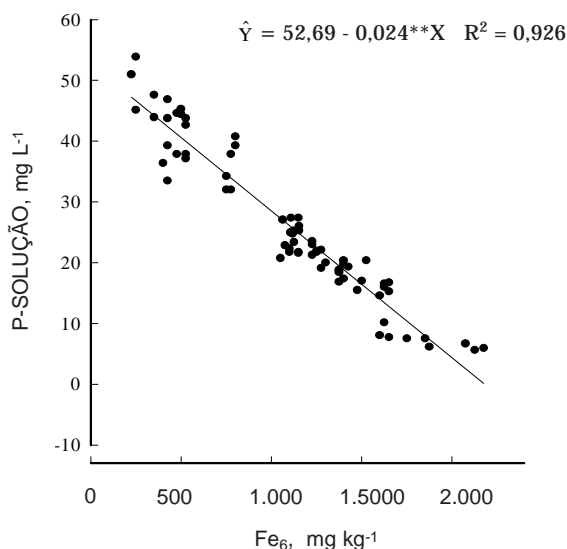


Figura 5. Relação entre os teores de P na solução, após a adição de uma quantidade equivalente à dose de 600 mg kg^{-1} de P e os teores de ferro extraídos por oxalato de amônio $0,2 \text{ mol L}^{-1}$, nas amostras dos seis solos, originais e após submetidas aos períodos de alagamento e de secagem por 21 dias.

temperatura, do teor e qualidade da matéria orgânica e da natureza do solo.

Encontrou-se significativa relação entre os teores de fósforo na solução, após equilíbrio das amostras com a solução que continha fósforo na concentração equivalente à dose de 600 mg kg^{-1} de P, e os teores de ferro na fração Fe_6 (Figura 5). Após os períodos de alagamento e o subsequente período de secagem dos solos, verificou-se uma tendência muito definida de diminuição dos teores do fósforo na solução com o aumento dos teores de ferro em formas de alta reatividade química (Fe_6). Isto corrobora que a adsorção do fósforo aumenta com o ciclo de alagamento e secagem do solo decorrente do aumento das frações de ferro de maior reatividade (Quadro 2). Tal comportamento pode indicar que o fósforo suprido ao solo após um período de alagamento prévio vai reagir com os compostos de ferro recentemente precipitados, de alta reatividade química, diminuindo a sua disponibilidade e conseqüente eficiência de utilização pelas plantas.

CONCLUSÕES

1. As formas de ferro de baixa cristalinidade (Fe_6) aumentaram com o alagamento dos solos e, após a secagem, decresceram; entretanto, ficaram acima dos níveis iniciais.
2. Os teores de fósforo disponível, determinados pelo extrator Bray-1, aumentaram com o alagamento e, com exceção do solo Algorta, diminuíram para valores similares aos iniciais após a secagem dos solos.
3. O alagamento dos solos e a posterior secagem determinaram um aumento significativo da adsorção do fósforo do solo devido ao aumento das frações de ferro de maior reatividade. Houve uma tendência muito definida de diminuição do fósforo na solução dos solos com o aumento dos teores de ferro em formas de alta reatividade química (Fe_6).
4. Períodos curtos de alagamento, seguidos de secagem, foram suficientes para determinar uma diminuição na disponibilidade do fósforo, pela maior adsorção e redução de seus teores na solução.

LITERATURA CITADA

- AGUIRRE, E. & RIOS, M. Relevamiento nutricional y de otras variables de producción en el área arrocerá de Tacuarembó. Montevideo, Facultad de Agronomía, 1984. 249p. (Tese - Engenheiro Agrônomo)
- BRADLEY, J.; VIMPANY, I. & NICHOLLS, P.J. Effects of water logging and subsequent drainage of a pasture soil on phosphate sorption, extractable phosphate and oxalate-extractable iron. *Aust. J. Soil Res.*, 22:455-461, 1984.

- BRANDON, D.M. & MIKKELSEN, D.S. Phosphorus transformations in alternately flooded California soils: I. Cause of plant phosphorus deficiency in rice rotation crops and correctional methods. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 43:989-994, 1979.
- BRAY, R.H. & KURTZ, L.T. Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soils. *Soil Sci.*, 59:39-45, 1945.
- BRUME, H.P. The fate of iron during soil formation in humid-temperate environments. In: STUCKI, J.W.; GOODMAN, B.A. & SCHWERTMANN, U., eds. *Iron in soils and clay minerals*. Dordrecht, D. Reidel Publishing Company, 1988. p.749-777.
- CAYSSIALS, R. & PUENTES, R. Determinación y fraccionamiento de hierro y aluminio libre en algunos suelos del Uruguay. Montevideo, Facultad de Agronomía, 1974. 88p. (Tese - Engenheiro-Agrônomo)
- DE DATTA, S.K.; MOOMAW, J.C.; RACHO, V.V. & SIMSIMAN, J.V. Phosphorus supplying capacity of lowland rice soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 30:613-617, 1966.
- FERRANDO, M. & MERCADO, G. Efecto de períodos alternados de exceso de agua y secado de los suelos en la disponibilidad de fósforo. Montevideo, Facultad de Agronomía, 1997. 92p. (Tese - Engenheiro-Agrônomo)
- FORSYTHE, W. Análisis de la distribución del tamaño de las partículas. In: FORSYTHE, W. *Física de suelos; manual de laboratorio*. Costa Rica, IICA, 1975. p.46-68.
- HERNANDEZ, J. & MEURER, E.J. Asorção de fósforo e sua relação com formas de ferro em dez solos do Uruguai. *R. Bras. Ci. Solo*, 22:223-230, 1998.
- KILMER, V. The estimation of free iron oxides in soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 24:420-421, 1960.
- MUNCH, J.C.; HILLEBRAND, T.H. & OTTOW, J.C.G. Transformations in the Fe_o/Fe_d ratio of pedogenic iron oxides affected by iron-reducing bacteria. *Can. J. Soil Sci.*, 58:475-486, 1978.
- NELSON, D.W. & SOMMERS, L.E. Total carbon, organic carbon and organic matter. In: PAGE, A.L., ed. *Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties*. Madison, American Society of Agronomy, 1982. p.539-579 (Agronomy Monograph, 9)
- PATRICK Jr., W.H. & MIKKELSEN, D.S. Plant nutrient behavior in flooded soil. In: OLSON, R.A.; ARMY, T.J.; HANWAY, J.J. & KILMER, V.J., eds. *Fertilizer technology and use*. 2.ed. Madison, Soil Science Society of America, 1971. p.187-215.
- PONNAMPERUMA, F.N. The chemistry of submerged soils. *Adv. Agron.*, 24:29-96, 1972.
- ROY, A.C. & DE DATTA, S.K. Phosphate sorption isotherms for evaluating phosphorus requirement of wetland rice soils. *Plant Soil*, 86:185-196, 1985.
- SAH, R.N.; MIKKELSEN, D.S. & HAFEZ, A.A. Phosphorus behavior in flooded-drained soils. I. Effects on phosphorus sorption. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 53:1718-1722, 1989.
- SAS Institute, Inc. *SAS User's Guide: Statistics*. Cary, 1985.
- SAVANT, N.K. & ELLIS Jr., R.L. Changes in redox potential and phosphorus availability in submerged soils. *Soil Sci.*, 98:388-394, 1964.
- SHAHANDEH, H., HOSSNER, L.R. & TURNER, F.T. Phosphorus relationships in flooded rice soils with low extractable phosphorus. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 58:1184-1189, 1994.
- SCHWERTMANN, U. & TAYLOR, R.M. Iron oxides. In: DIXON, J.B. & WEED, S.B., eds. *Minerals in soil environments*. 2.ed. Madison, Soil Science Society of America, 1989. p.379-438.
- SCHWERTMANN, U. Use of oxalate for Fe extraction from soils. *Can. J. Soil Sci.*, 53:244-246, 1973
- TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.A.; BOHNEN, H. & VOLKWEISS, S.J. *Análises de solo, plantas e outros materiais*. 2.ed. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1985. 174p. (Boletim Técnico, 5)
- UNIVERSIDAD DE LA REPUBLICA DO URUGUAY. FACULTAD DE AGRONOMIA. *Pautas de trabajo en el laboratorio de suelos*. Montevideo, 1980. 21p.
- van BREEMEN, N. Effects of seasonal redox processes involving iron on the chemistry of periodically reduced soils. In: STUCKI, J.W.; GOODMAN, B.A. & SCHWERTMANN, U., eds. *Iron in soils and clay minerals*. Dordrecht, D. Reidel Publishing Company, 1988a. p.797-809.
- van BREEMEN, N. Long-term chemical, mineralogical and morphological effects of iron-redox processes in periodically flooded soils. In: STUCKI, J.W.; GOODMAN, B.A. & SCHWERTMANN, U., eds. *Iron in soils and clay minerals*. Dordrecht, D. Reidel Publishing Company, 1988b p.811-823.
- VELLOSO, A.C.X.; DE OLIVEIRA, C. & LEAL, J.R. Processos redox em glei húmico do Estado do Rio de Janeiro: III. Variação das concentrações de Fe (II) e fosfato. *R. Bras. Ci. Solo*, 17:27-33, 1993.
- WILLET, I.R. & HIGGINS, M.L. Phosphate sorption by reduced and reoxidized rice soils. *Aust. J. Soil Res.*, 16:319-326, 1978.
- WILLET, I.R. & HIGGINS, M.L. Phosphate sorption and extractable iron in soils during irrigated rice-upland crop rotations. *Aust. J. Exp. Agric. Anim. Husb.*, 20:346-353, 1980.
- WILLET, I.R. Causes and prediction of changes in extractable phosphorus during flooding. *Aust. J. Soil Res.*, 27:45-54, 1989.
- YAMANE, I. Electrochemical changes in rice soils. In: INTERNATIONAL RICE RESEARCH INSTITUTE. *Soils and rice*. Los Baños, 1978. p.381-398.