

FIXAÇÃO DE FOSFATO EM TRÊS SOLOS  
DO MUNICÍPIO DE MOSSORÓ - RN

JOSÉ WALTER DA FONSÊCA

Orientador: Prof. Moacyr de Olivei  
ra Camponez do Brasil Sobrinho

Dissertação apresentada à Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", da Universidade de São Paulo, para a obtenção do título de Mestre em Solos e Nutrição de Plantas.

P I R A C I C A B A  
Estado de São Paulo - Brasil  
Junho, 1977

D E D I C O

À minha esposa e ao meu filho.

Aos meus Pais e Irmãos.

AGRADEÇO às seguintes pessoas

Prof. Dr. Moacyr de Oliveira Camponez do Brasil Sobrinho

Prof. Dr. T. Kinjo

Prof. Dr. André Martin Louis Neptune

Engº Agrº Jerônimo Vingt-Un Rosado Maia

Engº Agrº Neydson Caldas Mattos Correia

Engº Agrº Pedro Fernandes Pereira

e Instituições

ESCOLA SUPERIOR DE AGRICULTURA DE MOSSORÓ

E.S.A. "Luiz de Queiroz" - Universidade de São Paulo

PROGRAMA DE DESENVOLVIMENTO DO ENSINO DAS CIÊNCIAS AGRÁRIAS -

P R O D E C A

Cooedenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior -

C A P E S

Departamento de Solos e Geologia da ESALQ

## Biografia do Autor

JOSÉ WALTER DA FONSÊCA, natural de ANGICOS, ESTADO do RIO GRANDE DO NORTE, nascido a 15 de Agosto de 1952, filho de Valdir Martins da Fonsêca e Heloisa Soares da Fonsêca.

Diplomado Engenheiro Agrônomo pela Escola Superior de Agricultura de Mossorô - ESAM, em 15 de Dezembro de 1973.

Professor junto ao Departamento de Química e Tecnologia da ESAM, desde Fevereiro de 1974.

Bolsista da Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES, desde Agosto de 1975.

## Í N D I C E

	página
R E S U M O	ix
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1. Aspectos Gerais	3
2.2. Fatores que afetam a fixação de Fósforo pelo Solo	3
2.2.1. Influência do Alumínio Trocável na fixação do Fósforo	3
2.2.2. Influência do pH sobre a fixação do Fósforo	5
2.2.3. Influência dos Óxidos e hidróxidos de Ferro e Alumínio na fixação do Fósforo	6
2.2.4. Influência da Matéria Orgânica na fixação do Fósforo	10
2.2.5. Influência das Argilas Silicatadas na fixação do Fósforo	11
2.2.6. Influência do tempo de contato na fixação do Fósforo	13
2.2.7. Influência do Cálcio e Magnésio na fixação do Fósforo	14
2.3. Mecanismos da fixação de Fosfatos	15
2.4. Métodos de Estudo da fixação do Fósforo	16
3. MATERIAL E MÉTODOS	18
3.1. Materiais	18
3.1.1. Solos	18
3.1.2. Material de Laboratório e do Ensaio biológico	22
3.1.2.1. Fontes dos Nutrientes empregados	22
3.1.2.2. Vasos	22
3.1.2.3. Temperatura	22
3.1.2.4. Sementes	22
3.2. Métodos	22
3.2.1. Coleta, preparo e armazenamento das amostras de solo	22
3.2.2. Métodos físicos de análise	23

3.2.2.1. Análise granulométrica	23
3.2.3. Métodos químicos de Análise	23
3.2.3.1. Carbono orgânico	23
3.2.3.2. pH em água e em KCl normal	23
3.2.3.3. Fósforo assimilável	23
3.2.3.4. Ataque pelo ácido sulfúrico	23
3.2.3.5. Complexo sortivo	24
3.2.3.6. Óxidos de Ferro livres	24
3.3. Método experimental de Laboratório	24
3.3.1. Determinação da capacidade máxima de adsorção de fósforo, usando a Isoterma de Larmuir	24
3.3.2. Determinação da percentagem de fosfato adsorvido pelo solo através do método de WAUGH e FITTS (1966)	25
3.3.3. Método experimental em casa de vegetação	26
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
4.1. Aplicabilidade da Isoterma de Larmuir na descrição da adsorção máxima de fósforo no solo	28
4.2. Valores "X" dos solos, obtidos pelo método de WAUGH e FITTS (1966)	30
4.2.1. Escolha do valor "X"	31
4.3. Produção de <i>Sorghum bicolor</i> (L.) Moench, variedade TEY-101 em gramas de matéria seca por vaso	31
4.4. Relação entre a adsorção de Fósforo e alguns componentes do solo	36
5. CONCLUSÕES	39
6. SUMMARY	41
7. LITERATURA CITADA	43

## LISTAS DAS TABELAS

Tabela	Página
1. Composição Granulométrica, Cor e Classificação textural dos solos	19
2. Características Químicas dos Solos	21
3. Quantidades de <u>P</u> adicionado aos solos em Testes de Laboratório	25
4. Quantidades de <u>P</u> aplicadas a cada solo relacionadas com a capacidade de Adsorção Máxima	27
5. Equação de Langmuir e Constantes de Retenção calculadas para os solos estudados	30
6. Percentagens de Fixação de Fósforo em Cambissol Eutrófico com A fraco, determinadas por WAUGH e FITTS (1966)	32
7. Percentagens de Fixação de Fósforo em Podzólico Vermelho Amarelo Equivalente Eutrófico Latossólico, determinadas por WAUGH e FITTS (1966)	32
8. Percentagens de Fixação de Fósforo em Podzólico Vermelho Amarelo Equivalente Eutrófico Abruptico Plinthico, determinadas por WAUGH e FITTS (1966)	33
9. Percentagens de Saturação das Adsorções Máximas com respectivas quantidades de Fósforo Aplicado, relacionadas com as percentagens de produção	34
10. Produção de sorgo em Matéria Seca no Ensaio de Vasos com Doses Crescentes de Fósforo, em Cambissol Eutrófico com A fraco	35
11. Produção de sorgo em Matéria Seca no Ensaio de Vasos com Doses Crescentes de Fósforo, em Podzólico Vermelho Amarelo Equivalente Eutrófico Latossólico	35
12. Produção de sorgo em Matéria Seca no Ensaio de Vasos com Doses Crescentes de Fósforo, em Podzólico Vermelho Amarelo Equivalente Eutrófico Abruptico plinthico	36
13. Relações entre as Adsorções Máximas e algumas características dos solos	38

## LISTAS DAS FIGURAS

Figura	Página
1. Isotermas de Adsorção de Fósforo com o tempo de Contato de 24 horas	52
2. Curvas de Extração de Fósforo para o Método de WAUGH e FITTS (1966)	53



## RESUMO

Usando amostras superficiais coletadas a uma profundidade média de 20cm de dois solos Alfisol e um Inceptisol do município de Mossoró-RN, determinou-se a capacidade máxima de adsorção de fosfatos.

Determinações de laboratório e ensaios em casa de vegetação foram efetuadas visando observar a importância de isoterma de Langmuir na descrição do fósforo adsorvido e sua relação com a disponibilidade para as plantas. Em laboratório, além da Isoterma de Langmuir, utilizou-se o método de Waugh e Fitts para a determinação da capacidade máxima de adsorção de fosfato pelos solos estudados.

A Isoterma de Langmuir descreveu a adsorção de fosfato quando as concentrações das soluções de equilíbrio eram iguais ou inferiores a  $2,26 \times 10^{-4}$  M de fósforo. As adsorções máximas dos solos testados variaram entre 204,08 e 294,12  $\mu\text{gP/g}$ , de solo.

Foi constatado existirem altas correlações entre as adsorções máximas dos solos em estudo e os teores de argila, óxidos de alumínio e ferro livres, matéria orgânica, cálcio e magnésio.

O método recomendado por Waugh e Fitts foi utilizado com o objetivo de se conseguir obter o valor "X" descrito pelos autores como sendo o ponto de máxima adsorção. Para o Inceptisol foi obtido um valor "X" em torno de 150 ppm de fósforo no solo, enquanto que para os Alfisols esse mesmo valor ficou evidenciado em torno de 100 ppm.

A produção de matéria seca das plantas de *Sorghum bicolor*

(L.) Moechen foi comparada com o fósforo adicionado aos solos de acordo com suas adsorções máximas. Os resultados mostraram que os solos com maiores adsorções máximas exigiram maiores quantidades de fósforo para as produções máximas de sorgo.

Em um confronto entre os três solos estudados, houve uma predominância na capacidade de fixação de fosfato para o Inceptisol.

## 1. INTRODUÇÃO

A pequena disponibilidade de fósforo para as culturas em solos brasileiros é, com efeito, um dos fatores limitantes para a produção agrícola. Pesquisas têm demonstrado, nas diferentes regiões do país, que quantidades ponderáveis desse elemento são necessárias para os processos biológicos, pois é o transportador normal de energia nas células, além de promover o crescimento e a reprodução de plantas e animais.

De acordo com HEMWALL (1957), somente 10 a 30% dos fosfatos solúveis, aplicados como fertilizantes são recuperados pelas plantas; o restante, 70 a 90%, fica "fixado" ou adsorvido na fase sólida do solo.

A fixação de nutrientes das plantas no solo pode ser definida como um processo pelo qual nutrientes, prontamente solúveis, são transformados em formas menos solúveis, por reações com compostos orgânicos ou inorgânicos do solo, ocorrendo como consequência uma restrição na mobilidade ou decréscimo na sua assimilação pela planta. A maioria dos solos converte rapidamente os fosfatos solúveis dos fertilizantes convencionais em formas relativamente insolúveis, diminuindo enormemente o aproveitamento do fósforo por parte do vegetal.

A primeira vez que se teve conhecimento da habilidade do solo em "reter" fósforo aconteceu na Europa, por volta de 1850; em 1900, apareceram citações semelhantes nos Estados Unidos (HEMWALL, 1957). Desde então, e de uma maneira geral, o termo "fixação" tem sido usado para designar a transformação de formas solúveis de fósforo em outras menos solú

veis (DEAN, 1949; HEMWALL, 1957; CATANI et al, 1960; KARDOS, 1955, citado por MELLO et al, 1972). Qualquer fenômeno que provoque diminuição na concentração do íon ortofosfato de uma solução em contato com o solo, é responsável pela fixação (CATANI et al, 1960).

KAMPRATH (1961) diz que é inerente aos solos vermelhos de regiões quentes e úmidos em geral baixos níveis de fósforo assimilável pelas plantas e altas capacidades de fixação do fósforo.

A fixação dos fosfatos pelo solo é de natureza complexa e ainda não bem compreendida e várias teorias têm sido propostas para explicá-la. Para os solos ácidos apontam-se como principais causas de fixação de fósforo a formação de fosfatos insolúveis de ferro, alumínio, titânio e manganês, entre outros; a adsorção aos óxidos hidratados, destes metais, e às argilas silicatadas. Nos solos alcalinos a fixação de fósforo tem sido atribuída à formação de fosfatos de cálcio insolúveis provocada pela precipitação do fosfato sobre as partículas de  $\text{CaCO}_3$  e a retenção pelas argilas saturadas com cálcio. Deve-se considerar, ainda, a utilização dos fosfatos inorgânicos pelos microorganismos do solo, ocasionando a fixação biológica (DEAN, 1949; HEMWALL, 1957; LARSEN, 1967; MELLO et alii, 1972).

O presente estudo teve por objetivo determinar a capacidade máxima de fixação de fosfatos e a porcentagem de saturação do solo em fósforo, no qual o elemento se torna suficientemente disponível para proporcionar ótimo desenvolvimento às plantas. As hipóteses de trabalho foram: que a adsorção máxima, calculada a partir da isoterma de Langmuir, fornece uma medida real da saturação do solo em fosfato; que essa adsorção está relacionada com as características do solo; que a adsorção máxima está relacionada, também, com a capacidade do solo em fornecer nutrientes para as plantas.

Pela própria natureza heterogênea do sistema solo-planta, não se pode definir limites para os fenômenos de fixação, adsorção e de retenção. Assim sendo, inúmeras vezes, estes termos são utilizados indistintamente neste trabalho.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1. Aspectos Gerais

A fixação de fósforo pelos solos, de uma maneira geral, há muito vem sendo estudada por vários pesquisadores como CRAWLEY (1902); McGEORGE (1922); MIDGLEY (1931); McGEORGE e BREAZEALE (1932); HANCE (1933); WEISER (1933); AIRES (1934); todos citados por DAVIS (1935); KURTZ et alii, (1946); COLEMAN et alii (1960), dentre outros, com o objetivo de oferecer um melhor conhecimento do aspecto do fenômeno da fixação.

DAVIS (1935) teria sido o primeiro a usar o termo sorção, para sugerir o reconhecimento de um mecanismo de retenção. Em seu trabalho, o autor reconheceu a possibilidade da adsorção estar envolvida no fenômeno de retenção do ânion  $PO_4^{3-}$  e admitiu a participação dos grupos OH das superfícies das partículas e dos cátions metálicos na sorção dos íons fosfatos, e orientou sua discussão, baseado no equilíbrio de Donnan. Foi ele, ainda, o primeiro a adequar a sorção de fosfato aos termos da equação de Landmuir, usada para a adsorção de gases.

### 2.2. Fatores que afetam a fixação do fósforo pelo solo

#### 2.2.1. Influência do alumínio trocável na fixação do fósforo

GUAARDER (1930); GUAARDER e GRAEHL-NIELSON (1935), citados por DEAN (1949), mostraram que, quando o alumínio e o fósforo se acham presentes em quantidades equivalentes, se combinam, formando um composto

muito pouco solúvel a valores de pH próximos de 4,0; com excesso de alumínio, a baixa solubilização passa a ocorrer numa faixa de valores de pH entre 4,0 e 7,0.

FRANKLIN & RETSENAUER (1960), estudando 17 solos de Washington, constataram que a fixação de fósforo foi altamente correlacionada com o alumínio trocável e com o alumínio solúvel em ácido cítrico 0,5M.

COLEMAN et alii (1960), em pesquisas sobre a sorção do fósforo em 60 amostras de subsolo, observaram que a adsorção se correlacionava com o conteúdo de alumínio trocável dos solos. A retenção do alumínio por lixiviação diminuiu a retenção do fósforo.

GUTNIK et alii (1967), através de estudos com solos derivados de cinzas vulcânicas, concluíram que ocorriam mudanças no fenômeno da fixação de fósforo devido à variação de pH. Foram encontradas correlações entre a quantidade de fósforo fixado e o teor de alumínio trocável.

MEIRA et alii (1968), investigando influência do alumínio trocável, argila, limo, matéria orgânica e superfície específica, na capacidade de retenção de fósforo de 16 unidades de solo da Zona da Mata do Estado de Pernambuco, constataram a participação do alumínio trocável na fixação do fosfato adicionado. A relação fósforo-alumínio trocável cresceu em importância quando a concentração do alumínio era próxima ou maior do que 1,0 e.mg./100g de solo.

FASSBENDER (1969.a) estudou a retenção e transformação de fosfato em oito latossolos da Amazônia do Brasil e verificou uma fixação de 26,84 a 51,6% do fosfato adicionado. Encontrou correlação significativa entre a retenção do fósforo e os teores de alumínio trocável ( $r=0,716$ ) e de matéria orgânica ( $r=0,860$ ).

REEVE & SUMNER (1970), em estudos feitos com oito oxissolos não encontraram relação entre o alumínio trocável e a fixação de fósforo e verificaram que a calagem não diminuiu a fixação. Os autores verificaram que a fixação de P se deveu mais à reação de adsorção do que a reação de precipitação.

FERREIRA (1973), em estudos sobre a fixação de fosfatos em latossolos roxo e vermelho-escuro, fase arenosa, de Jaboticabal, concluiu que a calagem, para os solos estudados, proporcionou melhor efeito do fosfato na produção vegetal, em ensaio de casa de vegetação.

LEAL e VELLOSO (1973), após pesquisas feitas sobre a adsorção de fosfato em latossolos sob vegetação de cerrado, verificaram que, nas condições experimentais usadas, onde a hidrólise do alumínio trocável não foi estimulada, não foi obtida nenhuma correlação entre os teores de alumínio trocável e a adsorção de fosfato.

Resultados obtidos em estudos de laboratórios, conduzidos por LOURENÇO (1973), demonstram que a aplicação de carbonato de cálcio, visando-se a precipitação do alumínio livre em solos ácidos do Estado do Paraná, não teve efeito significativo sobre a capacidade de retenção de fosfato pelo solo.

#### 2.2.2. Influência do pH sobre a fixação do fósforo

O pH é um dos fatores bastante discutido no fenômeno de fixação do fósforo pelo solo. E, não obstante as muitas divergências entre os autores, a maioria concorda que o fenômeno de fixação é mais pronunciado nas faixas extremas de acidez ou de alcalinidade.

HIBBARD (1935), estudando a fixação de fósforo em dez solos, verificou um aumento da mesma com o pH e com a adição de  $\text{Ca}^{2+}$  e de  $\text{CaCO}_3$ .

ROMINE e METZGER (1939) asseguram que a fixação de P está associada a baixos valores de pH.

KARIM e KHAN (1955) estudaram 26 solos do Paquistão, nos quais verificou-se um aumento na adsorção de fósforo correlacionada com a faixa de pH de 4,0 a 5,3, sendo que, daí por diante, houve decréscimo até pH 6,2.

HSU e JACKSON (1960) observaram que a fração inorgânica do fósforo no solo estava relacionada com pH. Acima de pH 7,0, o fósforo se unia, principalmente, ao cálcio; em pH menor que 7,0, as frações ligadas ao ferro e alumínio aumentaram.

GUTNIK et alii (1967) verificaram alterações no fenômeno de fixação de fósforo com a variação de pH em solos derivados de cinzas vulcânicas. A quantidade de fósforo retido diminuiu com o aumento de pH.

LEAL e VELLOSO (1973), estudando a desorção do fosfato adsorvido em latossolos sob vegetação de cerrado, concluíram que o pH teve grande influência sobre a adsorção máxima de fosfato nos latossolos estu

dados, diminuindo a adsorção com a elevação do pH. Ao se elevar o pH da solução de equilíbrio de 4,0 para 7,0, foi obtido desorção do fosfato adsorvido na ordem de 14 a 28%.

### 2.2.3. Influência dos óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio na fixação do fósforo

Em solos ácidos, a quantidade de fósforo fixado pelos se u í o x i d o s de ferro e de alumínio excede bastante à que é devida à precipitação química pelos cátions solúveis de ferro e alumínio.

HECK (1934), trabalhando no sentido de demonstrar a natureza dos compostos formados e a profundidade de penetração quando da aplicação de fosfatos solúveis em solos lateríticos e em solos ricos em cálcio trocável, mostra, de forma bastante clara, a grande ação fixadora dos óxidos e hidróxidos de alumínio. Além de propor vários esquemas que ilustram o mecanismo de fixação, concluiu que a formação de fosfatos de ferro e de alumínio não depende, necessariamente, da presença dos íons ferro e alumínio na solução do solo mas, sim, principalmente, do estado de hidratação dos seus óxidos.

KELLY e MIDGLEY (1943) demonstraram que a fixação do fósforo pelos hidróxidos de ferro e de alumínio é devida a uma troca aniônica, através da substituição das hidroxilas dos hidróxidos pelos íons fos fat os. Observaram, também, que, por desidratação, os compostos de ferro **perderam** a ação fixadora, enquanto os de alumínio tornaram-se mais **ati** **vos**.

ELLIS e TRUOG (1955) citaram como responsáveis pela retenção de fósforo no solo: a formação de fosfato de ferro e de alumínio ou adsorção de íons fosfatados pelos óxidos hidratados de ferro e de alumínio, em solos ácidos; a precipitação por cátions divalentes em solos neutros ou alcalinos; a adsorção nos minerais de argila; e a energia de ligação nas estruturas das argilas, através de cátions trocáveis.

CATANI e PELLEGRINO (1957), estudando três solos de Bauru, SP, consideraram que, para os solos ácidos e com teores de médio a alto em óxido hidratados de ferro e de alumínio, a causa principal da fixação do fósforo é sua adsorção às partículas coloidais do solo.



HEMWALL (1957) observou em estudos com solos ácidos que a fixação do fósforo era devida à formação de compostos insolúveis de ferro e de alumínio.

VOLK e McLEAN (1965), aplicando três níveis de  $^{32}\text{P}$  em quatro solos de Ohio (USA), com diferentes graus de retenção de fosfato, observaram que, em geral, mais de 90% do fósforo aplicado foram imobilizados como fosfatos de alumínio e de ferro. Os solos com alto poder de fixação apresentaram maior teor de fósforo ligado ao ferro, enquanto naqueles com menor poder de fixação, predominava o fósforo ligado ao alumínio.

BROMFIELD (1964) investigou a participação dos óxidos de ferro e de alumínio na fixação do fósforo em solos escoceses. Após a remoção de tais compostos, observou que a fixação era predominantemente devido aos óxidos de alumínio.

MACKENZIE e AMER (1964) estudaram o comportamento de fosfato monocálcico aplicado a seis solos de Ontário (Canadá), selecionados quanto ao pH, textura e teor de  $\text{CaCO}_3$ . Constataram que em cinco dos solos estudados (pH variando entre 5,3 a 7,2) a fração de fósforo ao ligado alumínio foi sempre maior que aquela ligada ao ferro. Apenas em um dos solos estudados (pH 7,6 e um equivalente a 69,9% de  $\text{CaCO}_3$ ) a fração do fósforo ligada ao cálcio cresceu e foi maior do que as primeiras duas citadas.

HSU (1964) concluiu que, quando uma solução de fosfato permaneceu por um ano em contato com solos levemente ácidos, surgiu no sistema uma nova fase formada por hidróxido férrico, o qual retinha a maior parte do fósforo fixado; demonstra, assim, que o fósforo não é fixado na forma de compostos, tais como a variscita e/ou strengita, e, sim, adsorvido a hidróxidos de ferro e alumínio amorfos (hidroxi-polímeros) existentes no solo. Em um outro trabalho, o mesmo autor identificou dois tipos de reação no solo: a primeira, procedida mais rapidamente e acreditada ser devida à adsorção do íon fosfato em hidróxidos e óxidos de ferro amorfos existentes no solo; a segunda, mais lenta, semelhante à anterior, porém sobre hidróxidos e óxidos desenvolvidos durante o experimento. Do ponto de vista prático, o autor ressalta o seguinte: (a) no conceito convencional de precipitação, a fixação de fósforo não terá lugar

até que o alumínio e/ou o ferro sejam liberados dos minerais do solo; (b) as atividades do alumínio e do ferro são limitadas pelo pH, sendo negligíveis a pH 5,0 ou maior. Mas tal limitação não é imposta à reação de superfície nos hidróxidos de alumínio e óxidos de ferro amorfos. Em solos ligeiramente ácidos ou neutros, a reatividade desses hidróxidos e óxidos pode ultrapassar em muito as atividades dos íons alumínio e ferro em solução e provocar o processo de sorção do íon fosfato; (c) a disponibilidade dos íons fosfatos adsorvidos está diretamente relacionada com a área superficial dos hidróxidos e óxidos amorfos e é governada pela solubilidade do composto formado. Quando as superfícies estão próximas da saturação, o fósforo adsorvido pode se encontrar altamente disponível para as plantas.

Para BACHE (1964), a fixação do fósforo por hidróxidos de ferro e de alumínio processa-se segundo três mecanismos: (a) numa larga faixa de pH ocorre uma reação parcial ou totalmente irreversível, sem precipitação, entre uma pequena quantidade de fósforo e os hidróxidos (sorção química); (b) sendo alta a concentração de fósforo e também as atividades do ferro e do alumínio, ocorre precipitação destes na forma de fosfatos insolúveis; (c) quando as atividades do ferro e do alumínio forem baixas e a concentração de fósforo for alta, ocorrerá uma reação reversível entre estes (sorção física).

HSU (1965) critica a confusão generalizada até então feita sobre o conceito de adsorção relacionada com a fixação de fósforo. Considera a adsorção de fosfato por alumínio ou por ferro como um caso especial de precipitação: o cátion metálico permanece como constituinte na fase original e reage com o íons fosfatos por resíduos de forças nas superfícies das partículas. A precipitação verdadeira poderá ocorrer se o fosfato remover o alumínio da rede cristalina originando a formação de uma nova fase. Em síntese, precipitação e adsorção seriam consequência do mesmo mecanismo - força de atração entre íons fosfato e íons ferro e/ou alumínio - dependendo exclusivamente da forma do cátion presente no momento da reação.

JUO e ELLIS (1968) estudaram as propriedades físicas e químicas dos fosfatos de ferro e alumínio relacionadas com a liberação de fósforo para as plantas. Concluíram que a eficiência destes compostos

em liberar o fósforo obedece à seguinte ordem decrescente: fosfatos amorfos de ferro e alumínio, fosfato de alumínio cristalino (variscita), fosfato de ferro cristalino (strengita). Para os autores, a maior eficiência dos fosfatos amorfos é devido às suas estruturas e grandes superfícies específicas; as formas amorfas tendem a passar para as formas cristalinas menos solúveis; a maior eficiência da variscita, em relação à strengita, deve-se à maior velocidade de cristalização desta.

CATANI e BATAGLIA (1968), através do estudo do fracionamento do fósforo em oito solos dos Estados de São Paulo e do Paraná, verificaram que a maior quantidade de fósforo foi ligada ao ferro e alumínio ocluídos (extraídos com  $\text{HCl} + \text{H}_2\text{SO}_4 - \text{HNO}_3$ , concentrados).

A importância dos óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio na fixação do fósforo em solos brasileiros está bem evidenciada em trabalhos desenvolvidos por FASSBENDER (1969), MOURA FILHO (1970), SYERS et alii (1971), LEAL et al (1973), dentre outros.

SHUKLA et alii. (1971), estudando 25 sedimentos de lagos de Wisconsin, verificaram que os óxidos de alumínio amorfos são o fator mais importante na adsorção do fósforo adicionado.

BITENCOURT e ZAMBELLO Jr. (1973) observaram que a adsorção máxima de P, calculada pela isoterma de Langmuir, está altamente correlacionada com o teor de óxidos de ferro livres dos solos.

LEAL e VELLOSO (1973), pesquisando sobre a adsorção de fosfato em latossolos sob vegetação de cerrado, verificaram que a adsorção máxima de fosfato dos solos, calculada pela equação de Langmuir, apresentou uma correlação significativa com os teores de óxidos amorfos de alumínio presentes ( $r=0,867$ ); entretanto, não foi encontrada qualquer correlação entre os teores de óxido amorfos de ferro e a adsorção de fosfato ( $r=0,417$ ); estes resultados sugerem que os óxidos amorfos de alumínio, nos solos estudados, predominam sobre os óxidos amorfos de ferro no estabelecimento das características de adsorção de fosfatos.

O fósforo, nos solos tropicais que apresentam alta capacidade de retenção, tende a se ligar com maior energia aos óxidos de ferro e aos de alumínio ativos. Os mecanismos dessas reações que se processam em etapas podem ser descritos por uma equação de 2ª ordem, a qual é determinada pela concentração de P na solução de equilíbrio e pela insatu-

ração do complexo de retenção do solo (KUO e LOTSE, 1972; BITTENCOURT e ZAMBELLO Jr., 1974).

#### 2.2.4. Influência da matéria orgânica na fixação do fósforo

Segundo autores como SAUCHELLI (1965), BUCKMAN e BRADY (1966), BLAK (1968) e TISDALE e NELSON (1970), a matéria orgânica tem grande influência na fixação de fosfato e depende, em parte, do seu teor no solo e de seu estágio de mineralização. A população microbiana vincula, temporariamente, fosfato inorgânico aos seus tecidos—fixação biológica (DEAN, 1949; HEMMALL, 1972).

BHAT & BOUYER (1968), estudando solos tropicais, constataram uma diminuição na fixação do fosfato e aumento do fósforo isotopicamente trocável, pela adição da matéria orgânica. Entretanto, a capacidade de fixação do fósforo era maior nos solos com maior teor da matéria orgânica original.

RODRIGUES e SANCHES (1968), após estudo de laboratório, observaram uma maior capacidade de fixação do fósforo em solos com maior teor de matéria orgânica.

Alguns dados experimentais tendem a indicar que a fixação do fósforo no solo não deve ser considerada como um estado no qual o nutriente está irremediavelmente perdido para as plantas; ao contrário, o fenômeno constituiria um importante mecanismo de proteção do fósforo contra as perdas por percolação. Na realidade, embora uma fração do fósforo fixado passe lentamente para formas inertes, parte dele está sujeita a passar para a solução do solo (CATANI, 1947; MENDES, 1950; SÁ et alii. 1968).

FASSBENDER (1969.b) afirmou que devido à presença de cargas eletro-positivas na matéria orgânica o íon  $H_2PO_4$  é adsorvido.

TISDALE e NELSON (1970), citando vários trabalhos, mostraram algumas vantagens que tem a matéria orgânica no aumento do fósforo disponível para a planta, tais como: - na decomposição orgânica da matéria orgânica, ocorre desprendimento de dióxido de carbono que, com a água, forma o ácido carbônico, que, por sua vez, pode decompor certos minerais primários;

- os extratos de humus podem aumentar a solubilidade dos

fosfatos:

- a. formando complexos fosfohúmicos que são mais facilmente assimiláveis pelas plantas;
- b. pode trocar o ânion do fosfato por ânions do ácido húmico;
- c. cobrir as partículas de sesquióxidos por húmus, diminuindo a capacidade de fixação de fosfato do solo.

LEAL et al. (1973) encontraram correlação altamente significativa entre adsorção de fósforo e teor de matéria orgânica do solo.

#### 2.2.5. Influência das argilas silicatadas na fixação do fósforo

Um outro processo de fixação de fósforo predominantemente em solos sob condições levemente ácidas abrange as argilas silicatadas tais como caulinita, illita e montmorilonita.

Uma gama de trabalhos tem mostrado a influência positiva do teor de argila na fixação de fosfato (CATANI e PEREGRINO, 1957; HEMWALL, 1957; OLSEN e WATANABE, 1957; FRANKLIN e RETSENAUER, 1960; LEAL et al. 1973; MACIEL, 1974).

STOUT (1939), através de investigações sobre o mecanismo da adsorção de fosfato pelas argilas caulinita, haloisita e bentonita, concluiu que o fenômeno se deve a uma troca reversível entre os íons fosfatos e as oxidrilas da rede cristalina. Observou, ainda, que a caulinita e a haloisita adsorveram mais fósforo que a bentonita, como consequência do maior número de oxidrilas disponíveis na superfície das duas primeiras.

COLLEMAN (1944.a) estudou a influência da textura das argilas caulinita e montmorilonita na fixação do fósforo em solos dos Estados Unidos, e observou que quase a totalidade do fósforo fixado pelas frações grosseiras (0,2 a 2,0 micra) e fina (menos que 0,2 micron) destes minerais era devido ao capeamento de óxidos livres de ferro e alumínio que os envolve. Após a presumível remoção destes óxidos, somente as frações finas da caulinita e montmorilonita foram capazes de fixar pequenas quantidades de fósforo.

COLLEMAN (1944.b), utilizando aquelas frações mais finas do trabalho anterior, estudou os mecanismos envolvidos no fenômeno de fixação e observou que os íons oxidrilas da rede cristalina de caulinita e da

montmorilonita pouco contribuíram para a troca com os íons fosfatos da solução do meio. O autor concluiu que a fixação do fósforo se deve à troca aniônica entre os íons fosfatos e as oxidrilas do capeamento de hidróxidos livres de ferro e alumínio dificilmente removíveis das argilas.

HASEMAN (1950) aponta um aumento da fixação de fósforo pelas argilas caulinita, illita e montmorilonita com a elevação de temperatura, concentração de fosfato na solução do meio e com a diminuição do pH.

ELLIS e TROUG (1955) confirmaram as conclusões obtidas por COLLEMAN (1944.b) ao verificarem que a montmorilonita, desprovida do capeamento de hidróxidos de ferro e alumínio, é praticamente incapaz de fixar fósforo.

KITTRICK e JACKSON (1956), utilizando o microscópio eletrônico, observaram que a caulinita e grenalita (silicato hidratado de ferro, com estrutura parecida com a da caulinita) reagem com o fosfato por um mecanismo de precipitação química, originando uma nova fase de fosfato cristalino. Os autores afirmam que esta precipitação é muito lenta à temperatura ambiente.

OLSEN e WATANABE (1957), verificaram que, dentro da fração argila, a adsorção foi proporcional à superfície específica e que os solos ácidos retiveram mais fósforo e com mais energia.

DE DATTA (1961), estudando a fixação de fósforo pela montmorilonita (bentonita Kashmir, Índia), saturada com hidrogênio, verificou que a retenção diminuía com o aumento do pH da solução fosfatada. Concluiu que a fixação do fósforo tanto foi devida à associação deste com as argilas, por forças físicas, como à formação de fosfatos insolúveis com o alumínio removido da rede cristalina.

MARSHALL (1964) admite que ocorrem dois tipos de adsorção em partículas: adsorção na superfície plana e nas arestas dos minerais, sendo que, para o autor, a adsorção deve ocorrer, principalmente, no segundo caso, conforme o visto em fotografias tomadas ao microscópio eletrônico, onde partículas de caulinita, previamente impregnadas com pirofosfato, são incapazes de adsorverem ouro finamente disperso nas suas arestas.

MULJADI et alii. (1966), através do estudo da retenção de fosfato pela caulinita e pelos hidróxidos de alumínio gibbsita e boehmita, sugerem, tal como fez BACHE (1944), três regiões de adsorção envolvidas no

fenômeno. Em duas regiões os sítios de reação responsáveis pela adsorção estão relacionados com átomos de alumínio presentes nas arestas dos minerais na terceira e última regiões, onde a isoterma de adsorção é linear, ocorre a penetração de fosfato em alguma parte amorfa da superfície do mineral.

KAFKAFI et alii (1967) verificaram que a totalidade do fosfato adsorvido pela caulinita era inicialmente trocável isotopicamente. Os autores concluíram que, se o fosfato for adsorvido em pequenas quantidades, parte dele passará diretamente para a forma fixada, ao passo que na presença de elevadas concentrações todo o fosfato adsorvido será trocável.

RAMULU et alii (1967), trabalhando com doze solos da Califórnia, verificaram que a fração argila, na qual predominava a caulinita, fixava mais fósforo e que dentro de cada grupo a fixação foi proporcional ao ferro livre.

LEAL e VELLOSO (1973), estudando a adsorção de fosfato em latossolos sob vegetação de cerrado encontraram correlação linear altamente significativa ( $r=0,938$ ) entre a adsorção máxima de fosfato e os teores de argila.

#### 2.2.6. Influência do tempo de contato na fixação do fósforo

HIBBARD (1935), através do estudo de fatores que influenciam a fixação, demonstrou que a maioria do fósforo adicionado foi fixado em poucas horas e a fixação pode continuar por um ano ou mais.

DE DATTA et alii (1963) encontraram em um solo reação muito rápida nos primeiros minutos e continuou rápida até 48 horas, após o que se tornou lenta, atingindo uma reação muito lenta, após 96 horas.

CATANI e GLORIA (1964), estudando oito solos do Estado de São Paulo, em trabalho com fósforo radioativo  $^{32}\text{P}_{15}$ , concluíram que o equilíbrio entre o fósforo fixado e o em solução foi de 16 horas.

LOURENÇO (1973) concluiu que a adsorção do fósforo aumentou com o tempo de reação. Em tempos muito curtos (5 a 10 minutos), a adsorção foi surpreendentemente alta. O tempo de 24 horas parece ser suficiente para estudos de adsorção em condições de "quase-equilíbrio". O autor observou, ainda, três regiões de velocidades de adsorção: uma que se completou até 2 horas, uma segunda de 2 a 24 horas e a terceira em tempos su-

periores a 24 horas.

BITTENCOURT e MONTANHEIRO (1975) afirmam que o valor máximo de retenção do fósforo por óxidos de ferro sintéticos começa a ocorrer somente após um tempo de equilíbrio de 22 horas.

BITTENCOURT e ZAMBELLO Jr. (1975), estudando o comportamento do fósforo em solos tropicais, através de reações de retenção, verificaram que o processo de retenção corresponde a uma etapa inicial mais rápida seguida de outras que se processam durante um intervalo de tempo maior.

#### 2.2.7. Influência do cálcio e do magnésio na fixação do fósforo

De acordo com CHANG e JACKSON (1957), nos solos alcalinos e calcários, embora os compostos de ferro e alumínio sejam também responsáveis por alguma retenção do fósforo, este fenômeno é atribuído, principalmente, à precipitação do fósforo pelos compostos de cálcio.

RAGLAND e SEAY (1957) estudaram o efeito do cálcio trocável sobre a fixação do fósforo pela fração argila de quatro solos Podzólicos de Kentucky (USA), e verificaram que, nas argilas previamente acidificadas, a fixação do fósforo aumentou quando a saturação do cálcio cresceu de 60%. Admitem os autores que a retenção do fósforo foi devida a formação de fosfatos de cálcio e à ligação  $H_2PO_4$  - cálcio - Micela.

CALVERT et alii (1960) afirmam que a fixação do fósforo, em qualquer solo, varia de acordo com cátions ativos presentes no sistema. No caso da presença de alumínio, cálcio e hidrogênio, a intensidade da fixação decresce nessa mesma ordem. Para os autores, a fixação do fósforo por argilas previamente acidificadas aumenta com a saturação de cálcio, devido à formação de fosfato de cálcio complexo, o que está de acordo com o proposto por ELLIS e TROUG (1955).

Para LINDSAY et alii (1962), o fosfato aplicado em solos com elevado teor de cálcio e em solos alcalinos precipita-se usualmente como fosfato bicálcico bihidratado ( $CaHPO_4 \cdot 2H_2O$ ) e/ou fosfato octacálcico ( $[Ca_4H(PO_4)_3 \cdot 3H_2O]$ ). Tais compostos reagem com a solução de solo, formando apatita. HUFFAMAN (1962) coloca a solubilidade destes compostos na seguinte ordem decrescente: fosfato bicálcico bihidratado, fosfato octacálcico, hidroxí-apatita.

SENGUPTA e CORNFIELD (1963), observaram que fosfatos solú-



veis aplicados em solos com alto teor de  $\text{CaCO}_3$  (16,5%) foram largamente fixados como fosfatos não apatíticos e como formas facilmente removíveis. Solos com baixos teores de  $\text{CaCO}_3$  (0,15%) apresentaram, além destas formas, fósforo ligado ao alumínio e ferro. Em nenhum caso foi verificada a presença de apatitas. A maior percentagem de fixação ocorreu nas primeiras 24 horas e decresceu com o aumento da concentração de fosfato. Não se verificou correlação significativa entre a fixação de fósforo e teores de  $\text{CaCO}_3$ , quando estes variaram de 0,5% a 47,2%

Segundo RACZ e SOPER (1967), o magnésio também reage com o fosfato adicionado aos solos, formando fosfato dimagnésico trihidratado ( $\text{MgHPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ) e/ou fosfato trimagnésico ( $[\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2]$ ). O fosfato dimagnésico por dissolução forma o fosfato trimagnésico menos solúvel em água.

STRONG e RACZ (1970), trabalhando quatro solos contendo diferentes teores de cálcio e magnésio, tratados com  $\text{K}_2\text{HPO}_4$  e  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  e incubados por vários meses, constataram a formação de seis diferentes fosfatos de cálcio e de magnésio: fosfato bicálcico bihidratado ( $\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), fosfato octacálcico ( $[\text{Ca}_4\text{H}(\text{PO}_4)_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}]$ ), um fosfato de cálcio ( $\text{Ca}_4\text{P}_2\text{O}_9$ ), fosfato de cálcio e magnésio ( $\text{CaMgPO}_4$ ), fosfato dimagnésico trihidratado ( $\text{MgHPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ) e fosfato trimagnésico com 22 moléculas de água ( $[\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 22\text{H}_2\text{O}]$ ). A conversão das formas mais solúveis destes compostos para as formas menos solúveis foi mais lenta quando se usou o  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ .

### 2.3. Mecanismos da fixação de fosfatos

HEMWALL (1957) julgou que a fixação do fósforo no solo, tanto pode ocorrer por precipitação como por adsorção, dependendo das condições existentes no solo. Esta fixação é devida à formação de compostos de ferro e alumínio do tipo  $\text{M}(\text{H}_2\text{O})_3(\text{OH})_2\text{H}_2\text{PO}_4$  (M= cátion de ferro ou alumínio) que podem precipitar ou ser adsorvidos no solo.

HSU (1964) reconheceu a complexidade do mecanismo de adsorção de fosfatos e considera que a literatura apresenta um quadro muito confuso sobre o assunto. No entanto, considerou que a fixação ocorria em duas reações: a primeira mais rápida devida à adsorção aos hidróxidos de alumínio amorfos e óxidos de ferro; a segunda, lenta, devida a estes mesmos compostos, porém quando eles iam se formando durante o experimento.

FASSBENDER (1966), citado por VASCONCELOS (1973), considerou, entre outros mecanismos, dois tipos de reação dos fosfatos:

- o primeiro tipo são as reações que obedecem os princípios físico-químicos, como a lei das massas. São reações de precipitação do fósforo em precipitados de baixa solubilidade, do tipo das apatitas  $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$ , estringita -  $\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , variscita -  $\text{AlPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  e outros fosfatos complexos, cristalinos ou amorfos;

- o segundo tipo de reação obedece leis específicas químico-coloidais. E ocorre na adsorção do fósforo pelas partículas coloidais, como: matéria orgânica, argilas e hidróxidos.

PRATT (1966) procurou mostrar que tanto a precipitação como a dissolução dos compostos de fósforo, bem como a adsorção e a desorção sobre a superfície podem ocorrer em um mesmo solo e ao mesmo tempo.

LARSEN (1967) sugeriu que a concentração do fósforo deve ser determinada pelo princípio do produto de solubilidade. Sugeriu, ainda, que o equilíbrio é controlado pela energia livre, a qual aumenta para o fósforo, quando a adsorção máxima se aproximar.

KINJO e PRATT (1971), após estudarem solos do Brasil, do México e da Colômbia, sugeriram que os locais de adsorção de nitrato, sulfato, cloreto e fosfato devem ser os mesmos, diferindo, apenas, quanto à afinidade pelos diferentes ânions. Como as quantidades de fosfato que os solos podem reter são bem maiores que a dos outros ânions, os autores admitem que podem existir dois ou mais tipos de sítios de adsorção de fosfato.

#### 2.4. Métodos de Estudos da fixação do fósforo

Há grande variação entre as diversas metodologias usadas para a determinação da fixação de fosfatos pelo solo.

A equação de Langmuir, base da teoria cinética dos gases, é usada para o estudo da adsorção de gases no solo. Frequentemente, se aplica esta equação no estudo da adsorção de líquidos e íons da solução por sólidos. Apesar do mesmo rigor, a base teórica não está amplamente desenvolvida (OLSEN e WATANABE, 1957).

Em muitos trabalhos, a adsorção máxima de fosfato tem sido determinada através da isoterma de Langmuir (OLSEN e WATANABE, 1957; HSU, 1964; MEIRA et alii, 1968; FASSBENDER, 1969.b; REEVE e SUMNER, 1970; BRA-

GA e DEFELIPO, 1972.b; VASCONCELOS, 1972; LOURENÇO, 1973; MATTOS FERREIRA, 1973; LEAL e VELOSO, 1973; BITTENCOURT e ZAMBELLO Jr., 1973).

Alguns autores têm utilizado para o estudo da adsorção de fosfato a equação de Freundlich, quando é limitada a variação na solução de equilíbrio (BARROW, 1961; GLADSTONE e LEWIS, 1960; BITTENCOURT e ZAMBELLO Jr., 1973).

Vários autores têm avaliado a adsorção máxima de fosfato através do método preconizado por WAUGH e FITTS. Na primeira reunião sobre Análise de Solo para fins de fertilidade (janeiro - 1967), realizada na Divisão de Pedologia e Fertilidade do Solo, foi recomendado que se fizessem estudos sobre a capacidade de fixação de fósforo nos solos brasileiros, como parte de recomendação extensiva a América do Sul. Para a uniformidade de resultados preconizada por BACHE & WILLIAMS (1971), para padronizar um índice de sorção na caracterização e comparação dos solos, deveria ser seguido o método proposto por WAUGH e FITTS (1966). O método é químico, é simples e tem sido usado em vários trabalhos (ANASTÁCIO, 1968; BRAGA e DEFELIPO, 1972.b; FERREIRA, 1973; MACIEL, 1974; REZENDE, 1974; ALMEIDA NETO, 1975).

O isótopo  $^{32}_{15}\text{P}$  também tem sido usado por alguns pesquisadores, com o objetivo de auxiliar a determinação da fixação do fósforo (CATANI e PELLEGRINO, 1957; FRANKLIN e RETSENAUER, 1960, CATANI e GLÓRIA, 1964; RAMULU et alii, 1967; FASSBENDER, 1969.a; MELLO, 1970; LOURENÇO, 1973; MACIEL, 1974).

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1. Material

Três solos foram empregados neste estudo, coletados no Município de Mossoró, no Estado do Rio Grande do Norte, os quais são bastante representativos do município, conforme dados do Mapa Exploratório - Reconhecimento de Solos do Estado do Rio Grande do Norte (1968).

##### 3.1.1. Solos

Solo I - Cambissol Eutrófico, com A fraco textura argilosa fase caatinga hiperxerófila relevo plano substrato calcário, coletado a 5,6 Km de Mossoró, no lado esquerdo da estrada Mossoró - Governador Dix-Sept Rosado. De acordo com a 7<sup>th</sup> Approximation of Soil Survey Staff (1967), ele é classificado como pertencente à ordem Inceptisol.

As características físicas e químicas são apresentadas nas tabelas 1 e 2, respectivamente.

Solo II - Podzólico Vermelho Amarelo Equivalente Eutrófico Latossólico textura argilosa fase caatinga hiperxerófila relevo plano, coletado no lado direito da estrada que liga as rodovias Jaguaruana - Mossoró e Aracati - Mossoró, na fazenda São João, distrito de Arisco. De acordo com a 7<sup>th</sup> Approximation of Soil Survey Staff (1967), ele é classificado co mo pertencente à ordem Alfisol.

As características físicas e químicas são apresentadas nas tabelas 1 e 2, respectivamente.

Solo III - Podzólico Vermelho Amarelo Equivalente Eutrófico argila de atividade alta abruptico plínthico textura média fase caatinga hiperxerófila relevo suave ondulado, coletado na localidade de Alto da Favela, na Serra do Carmo, distante 23 Km do entroncamento com a estrada Mossoró - Areia Branca, estando esta a 6 Km da Rodovia Mossoró - Açu. De acordo com a 7<sup>th</sup> Approximation of Soil Survey Staff (1967), ele é classificado como pertencente à ordem Alfisol.

As características físicas e químicas são apresentadas nas tabelas 1 e 2, respectivamente.

Informações complementares sobre o Município de Mossoró: Latitude 5°11'S, Longitude 37°20'W, altitude de 16m, precipitação média anual de 641,9mm, temperatura média anual de 27,8°C e temperaturas máxima e mínima de 34,8°C e 20,7°C, respectivamente. O clima, segundo Koeppen, é BSW'h'.

Tabela 1. Composição granulométrica, cor e classificação textural dos solos

Solo	Composição granulométrica(%)				Cor do Solo	Classe Textural Soil Survey Staff, 1951
	Areia Grossa	Areia Fina	Silte	Argila		
I	26	14	15	45	Vermelho Amarelo (5YR 4/6)	Argila
II	44	23	8	25	Vermelho Escuro (2,5YR 3/6)	Franco-Argilo-Arenosa
III	70	22	5	3	Bruno (10YR 4/3)	Arenosa

#### CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS

De acordo com os dados analíticos e descrição morfológica de campo, classificaram-se os solos estudados de acordo com o Soil Taxonomy (1976) como:

Solo I: Typic Euthrocrept

Solo II: Typic Paleustalf

Solo III: Typic Plinthustalf.

Conforme os dados do levantamento Exploratório - Reconheci-

mento de solos do Estado do Rio Grande do Norte (1968), eles foram classificados como:

Solo I: Cambissol Eutrófico com A fraco

Solo II: Podzólico Vermelho Amarelo Equivalente Eutrófico Latossólico

Solo III: Podzólico Vermelho Amarelo Equivalente Eutrófico Abruptico Plinítico.

A identificação dos solos através desses dois sistemas de classificação é de primordial importância para a extrapolação dos resultados obtidos para outros locais do município de Mossoró, onde ocorrem essas mesmas unidades taxonômicas.

Tabela 2. Características químicas dos solos

Solo	Complexo Sortivo (e mg/100gTFSA)					V (%)	P assi- mil. (ppm)	pH		Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	C (%)	Ki	Kr			
	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	S			Al	H						T	Água 1:2,5	KCl 1:2,5
I	14,5	3,8	0,89	0,13	19,3	0,0	0,0	19,3	100	1	7,6	6,8	5,5	12,3	0,73	2,92	2,28
II	4,4	1,7	0,87	0,04	7,0	0,0	0,0	7,0	100	1	7,0	6,3	3,1	8,8	0,72	2,19	1,79
III	1,4	0,4	0,15	0,04	2,0	0,0	0,0	2,0	100	12	7,6	7,4	0,5	1,9	0,17	1,58	1,36

### 3.1.2. Material de Laboratório e do Ensaio Biológico

#### 3.1.2.1. Fontes dos Nutrientes empregados

Nitrogênio	- $\text{NH}_4 \cdot \text{NO}_3$
Fósforo	- $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$
Potássio	- $\text{KCl}$
Enxofre	- $\text{CaSO}_4$ - $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ - $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
Boro	- $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$
Cobre	- $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
Molibdênio	- $\text{MoO}_4\text{NH}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
Zinco	- $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$

Devido os solos estudados não apresentarem alumínio trocável foi dispensada a aplicação de  $\text{CaCO}_3$  como corretivo.

#### 3.1.2.2. Vasos

Foram usados vasos de plástico com capacidade de 2000ml, sem drenagem.

3.1.2.3. Para verificação da temperatura utilizou-se termômetro de máxima e mínima.

3.1.2.4. Bandeja com Erlenmeyers de capacidade de 125 ml.

#### 3.1.2.5. Sementes

Foram utilizadas sementes de *Sorghum bicolor* (L.) Moench, variedade TEY - 101.

## 3.2. Método

### 3.2.1. Coleta, preparo e armazenamento das amostras de solo

As amostras foram coletadas superficialmente até a profundidade de 20 cm, secadas à sombra, bem misturadas, passadas em peneira de 2 mm e conservadas em sacos plásticos.



### 3.2.2. Métodos Físicos de Análise

#### 3.2.2.1. Análise Granulométrica

Determinada por sedimentação em cilindro de Kiettgen, sendo usado NaOH como agente dispersante e agitador de alta rotação. Foram calculadas quatro frações, de acordo com os limites norte-americanos. Os resultados da análise granulométrica são apresentados em números inteiros, desprezando-se os demais por não serem significativos (Tabela 1).

### 3.2.3. Métodos Químicos de Análise

#### 3.2.3.1. Carbono Orgânico

Determinado por oxidação da matéria orgânica com bicromato de potássio 0,4 N, segundo o método Tiurin, modificado por VETTORI (1969).

#### 3.2.3.2. pH em água e KCl normal

Determinados potenciometricamente numa suspensão solo-líquido de aproximadamente 1:2,5 e o tempo de contato de uma hora, agitando-se a suspensão imediatamente antes da leitura (VETTORI, 1969).

#### 3.2.3.3. Fósforo Assimilável

Extraído com uma solução 0,05N em HCl e 0,025N em  $H_2SO_4$  (North Caroline). O P é dosado colorimetricamente pela redução do complexo fosfomolibdico com ácido ascórbico, em presença de sal de bismuto (VETTORI, 1969).

#### 3.2.3.4. Ataque pelo Ácido Sulfúrico

Utilizou-se 2,0g de TFSA, 50 ml de  $H_2SO_4$  de peso específico 1,47 e fervura sob reflexo durante uma hora, determinando-se os teores  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$  e  $Fe_2O_3$ , conforme VETTORI (1969). As relações  $K_i$  e  $K_r$ , isto é, as relações  $SiO_2/Al_2O_3$  e  $SiO_2/Al_2O_3 + Fe_2O_3$  foram calculadas sob forma molecular, baseadas nas determinações acima descritas.

### 3.2.3.5. Complexo Sortivo

Através da determinação individual dos cátions trocáveis,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{H}^+$  e  $\text{Al}^{+++}$ , obteve-se o complexo sortivo do solo, seguindo-se a metodologia descrita por VETTORI (1969). O Cálcio, magnésio e alumínio foram extraídos com KCl N; potássio e Sódio com HCl 0,05N e o hidrogênio + alumínio com acetato de cálcio normal ajustado a pH 7,0. O somatório das bases trocáveis de bases (V %) foi determinado através das expressões:

$$S = \text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++} + \text{K}^+ + \text{Na}^+ \text{ em emg/100g solo}$$

$$T = S + \text{H}^+ + \text{Al}^{+++} \text{ em emg/100g solo}$$

$$V\% = \frac{S}{T} \times 100$$

### 3.2.3.6. Óxidos de Ferro Livre

A extração foi feita com ditionito de sódio e a determinação por fotolorimetria com filtro de 499 milimicra.

## 3.3. Método Experimental de Laboratório

### 3.3.1. Determinação da capacidade máxima de adsorção de fósforo, usando Isoterma de Langmuir

Determinação da capacidade máxima de adsorção de fósforo, usando a Isoterma de Langmuir (BRAGA, 1971.a).

A equação de Langmuir tem como base a teoria cinética dos gases. É extensamente usada para descrever a adsorção de gases pelos sólidos e também a adsorção de líquidos e íons da solução por (HSU, 1964).

Em sua forma linear, a equação da Isoterma de Langmuir é:

$$\frac{C}{x/m} = \frac{1}{Kb} + \frac{1}{b} \cdot C$$

onde:

C = Concentração de P na solução de equilíbrio

x/m = Quantidade de P adsorvido/unidade de peso

b = Capacidade máxima de adsorção

K = Constante de energia de retenção de P

1/b = Inclinação da reta da Isoterma

Marcha Analítica: Foram pesadas amostras de 2,5g de TFSA, após serem passadas em peneira 270, em seguida foram colocadas em erlenmeyers de 125 ml, aos quais foram adicionados 25 ml de soluções de fosfatos com concentrações de 0,5, 10, 15, 20, 30, 40, 50 e 60 ppm de P, correspondentes a uma série de padrões. Em seguida, agitou-se os erlenmeyers por 24 horas. Filtrou-se, utilizando-se papel Whatman nº 42 e fez-se, logo depois, a determinação do fósforo, como já foi descrita em 3.2.3.3. Foram utilizadas duas repetições para cada tratamento. O pH da suspensão era ajustado para  $6,0 \pm 0,1$  com soluções de HCl e KOH.

Para impedir atividade microbológica, foi adicionado cloroformio a cada tratamento antes da agitação.

### 3.3.2. Determinação da percentagem de fosfato adsorvido pelos solos através do método descrito por WAUGH e FITTS (1966)

Preparo das Soluções de Fósforo:

Solução Estoque - 2500 ppm de P. Foram dissolvidas 9,44g de  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$  amorfo em água destilada, até completar 1000 ml.

Tabela 3. Quantidades de P adicionado aos solos em testes de Laboratório

Tratamento	Volume da Sol. p/ diluir a 50 ml(ml)	Concentração nos Balões de 50ml (ppm)	Concentração no Solo (ppm)
1	0,0	0,0	0,0
2	2,5	125,0	50,0
3	5,0	250,0	100,0
4	7,5	375,0	150,0
5	10,0	500,0	200,0
6	12,5	625,0	250,0

Marcha Analítica: Foram colocados 10ml de TFSA, com duas repetições, em erlenmeyers de 125 ml, os quais receberam 4 ml (mais ou menos a quantidade de solução que corresponde à capacidade de campo, segundo WAUGH e FITTS, 1966) das soluções preparadas nos balões volumétricos de 50 ml que receberam os diversos tratamentos. Na adição dos 4 ml foram usa-

das pipetas de 2 ml, sendo gotejados 2 ml da solução na parte central dos erlenmeyers que continham os solos e 2 ml na parte periférica.

A cada tratamento foi adicionado clorofórmio com o objetivo de evitar a atividade microbiológica.

Os erlenmeyers foram cobertos com plástico PARAFILM "M" (1) para evitar perdas de umidade pelo solo. A incubação foi feita durante quatro dias.

A determinação do fósforo foi feita no quinto dia, de acordo como já foi descrito em 3.2.3.3.

Escolha do Valor "X"

A escolha do valor "X" foi feita através de gráfico, assinando-se na ordenada o fósforo extraído na análise e na abscissa a quantidade de fósforo aplicada como  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ .

O ponto onde o fósforo extraível aumenta abruptamente é considerado como valor "X" por WAUGH e FITTS (1966).

### 3.3.3. Método Experimental em Casa de Vegetação

Foram usados vasos de plástico com capacidade de 2000ml, sem drenagem. Nos vasos foram colocados 2 Kg de solo.

Os níveis de fósforo aplicados a cada solo correspondem a seis tratamentos com quantidades equivalentes a 0,25, 50, 75, 100 e 125 por cento de suas adsorções máximas pela Isoterma de Langmuir. (Tabela 4). Os tratamentos receberam uma adubação de 250 ppm de nitrogênio, na forma de nitrato de amônio; 167 ppm de potássio, na forma de cloreto de potássio; 7 ppm de zinco, na forma de sulfato de zinco heptahidratado; 3,5 ppm de boro, na forma de bórax; 13,5 ppm de enxofre, na forma de sulfato de cálcio; 0,4 ppm de molibdênio, na forma de molibdato de amônio tetra hidratado e 1,7 ppm de cobre, na forma de sulfato de cobre pentahidratado, e foram encubadas por 8 dias, com uma umidade correspondente a 70 por cento da capacidade de campo.

O delineamento experimental usado foi blocos inteiramente casualizados com seis tratamentos e três repetições.

---

(1) Papel parafinado - PARAFIL "M" - MARATHON - A - A Division of American Can Company - Menasha - Wisconsin.

A planta teste foi o Sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) . Foram plantadas vinte sementes por vaso. Seis dias após a germinação, efetuou-se o desbaste, deixando-se seis plantas por vaso. Um único corte foi feito trinta dias após a germinação, e a massa verde foi secada em estufa a 70°C e depois pesada.

As médias entre os tratamentos foram comparadas entre si, através do teste de TUKEY, aos níveis de 1% e 5% (PIMENTEL GOMES, 1963).

Tabela 4. Quantidades de fósforo aplicadas a cada solo relacionadas à capacidade de adsorção máxima

PERCENTAGENS D E SATURAÇÃO	S O L O S		
	I	II	III
	Kg de P/ha		
25	147	128	102
50	294	256	204
75	441	384	306
100	448	512	408
125	735	640	510

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Aplicabilidade da Isoterma de Langmuir na descrição da adsorção máxima de fósforo no solo

Os primeiros pesquisadores a aplicarem a equação de Langmuir na avaliação da adsorção de fósforo no solo foram OLSEN e WATANABE, em 1957. Desde então, muitos outros pesquisadores têm utilizado o mesmo processo na determinação da capacidade máxima de adsorção de fósforo no solo (HSU, 1964; UDO e USU, 1972; BITTENCOURT e ZAMBELLO Jr., 1973). A equação de Langmuir é deduzida, considerando-se, apenas, uma camada iônica adsorvida na superfície da partícula (adsorção química), com energia de ligação constante (GLADSTONE e LEWIS, 1960; GUNARY, 1970).

Através da equação de Langmuir, obtém-se a quantidade de soluto adsorvido por unidade de massa do adsorvente ( $X/M$ ), em função da concentração da solução de equilíbrio ( $C$ ):

$$\frac{X}{M} = \frac{K_1 C}{K_2 C + 1} \quad (I)$$

$K_1$  e  $K_2$  são constantes de proporcionalidades relacionadas com adsorção, liberação e fração da superfície do adsorvente coberta pelo adsorvido (GLADSTONE e LEWIS, 1960). A obtenção da forma linear da equação pode ser obtida a partir de (I), considerando-se  $K_1 = K_b$  e  $K_2 = K$ , onde  $b$  representa a adsorção máxima e  $K$  a constante de seletividade para o sistema considerado:

$$\frac{C}{X/M} = \frac{1}{K_b} + \frac{1}{b} C$$

A Tabela 5 mostra as equações obtidas para os solos estudados na forma linear da Isoterma de Langmuir. Os limites das concentrações de equilíbrio foram o mínimo de  $0,19 \times 10^{-4} \text{ M}$  e o máximo de  $2,26 \times 10^{-4} \text{ M}$  para os três solos testados. Quando as concentrações das soluções excediam o limite superior, os resultados obtidos não se ajustavam à forma linear da equação.

OLSEN e WATANABE (1957) verificaram que a aplicação da equação de Langmuir, na forma linear, só era possível para soluções de equilíbrio com concentrações compreendidas entre  $0,5 \times 10^{-4} \text{ M}$  a  $5,0 \times 10^{-4} \text{ M}$ . Posteriormente, outros autores observaram, também, a existência de limites na concentração das soluções de equilíbrio, além dos quais a representação gráfica da equação se comportava semelhante aos apresentados por OLSEN e WATANABE (1957) (LARSEN, 1967; MAGALHÃES; 1969; GUNARY, 1970; MATTOS FERREIRA, 1973). Trabalhos desenvolvidos por VELLOSO (1969), em solos alofânicos da Colômbia, mostram que, em concentração de equilíbrio de  $15 \times 10^{-4} \text{ M}$ , a representação gráfica da Isoterma ainda era linear. Em alguns solos europeus, onde a concentração das soluções de equilíbrio varia de  $0,5 \times 10^{-4} \text{ M}$  a  $5,0 \times 10^{-4} \text{ M}$ , não houve ajustamento da Isoterma à forma linear (LARSEN, 1967; GUNARY, 1970).

HSU e RENNIE (1962) apontaram limitações quanto à aplicação da Isoterma de Langmuir. Os autores verificaram que o alumínio trocável, existente no solo, poderia precipitar o fósforo da solução e que a esses resultados, também, se poderia aplicar a Isoterma de Langmuir. No presente trabalho, a fim de se contornar esse tipo de reação, as adsorções foram determinadas a pH 6,0 - 0,1.

Tendo-se em vista que o limite superior das concentrações de equilíbrio usadas neste trabalho está em concordância com a maioria dos autores e, também, os elevados coeficientes de correlação (r) obtidos (Tabela 5), pode-se usar a Isoterma de Langmuir para calcular a capacidade de adsorção máxima de fósforo em cada solo.

As adsorções máximas de fósforo nos solos estudados variaram de  $294,12 \text{ } \mu\text{g P/g}$  solo no Cambissol Eutrófico com A fraco a  $204,08 \text{ } \mu\text{g P/g}$  solo no Podzólico Vermelho Amarelo Equivalente Eutrófico Abruptico Plinthico.

A energia de retenção (K) de fósforo para cada solo, calculada através da equação de Langmuir, assumiu valores semelhantes aos obtidos por BITTENCOURT e ZAMBELLO Jr. (1973) e LOURENÇO (1973). (Tabela 5).

A importância dessa constante tem sido discutida por alguns autores. VELLOSO (1969) e RENNIE e MACKERCHER, citados por ESTRADA (1971), são de opinião que o cálculo da mesma é grandemente influenciada pelo erro experimental e que pouca importância pode se dar às diferenças encontradas.

Tabela 5. Equação de Langmuir e constantes de retenção calculadas para os solos em estudo

Solos	Regressão Linear	Adsorção Máxima $\mu\text{g P/g sol.}$	Constante de Retenção (K) $\mu\text{g P/ml Sol. Equi}$ líbrio	r
I	$Y=1,1107+0,0034X$	294,2	0,0031	0,9780
II	$Y=1,2479+0,0039X$	256,40	0,0031	0,9179
III	$Y=1,2832+0,0049X$	204,08	0,0038	0,9122

#### 4.2. Os valores "X" dos solos, obtidos pelo Método de WAUGH e FITTS (1966)

O valor "X", proposto pelo método de WAUGH e FITTS (1966), é uma aproximação da concentração de fósforo, necessária para vencer o efeito da fixação pelo solo, acarretando um aumento do fósforo disponível para as plantas. A utilização do valor "X" pode ser feita como guia na determinação dos níveis de fósforo a serem aplicados no estudo em vasos.

Os estudos feitos com solos brasileiros não têm mostrado valores "X" bem definidos, como o de ANASTÁCIO (1968), que estudou 36 solos de várias unidades de solos do Brasil, FERREIRA (1973), estudando 2 solos do Estado de São Paulo, REZENDE (1974), estudando solos dos Estados da Bahia e Sergipe, e ALMEIDA NETO (1975), estudando 3 solos de "Cerrado" do Estado de Goiás.

As percentagens de fixação de fósforo variaram de 98,20 %, quando foram adicionadas 150 ppm de P ao Cambissol Eutrófico com A fraco, diminuindo até 90,84%, quando foram adicionadas 250 ppm de P ao Podzólico Vermelho Amarelo Equivalente Eutrófico Abrupto Plinthico (Tabelas 6, 7 e 8).

Pelos resultados apresentados nas tabelas 6, 7 e 8, verifica



-se que o Cambissol foi o que mais fixou fósforo. Foi ele, também, o que menos liberou fósforo para as plantas, o que está evidenciado nas produções de *Sorghum bicolor* (L.) Moench, variedade TEY-101, apresentadas nos quadros 10, 11 e 12.

O ensaio de vasos mostram que o Podzólico Vermelho Amarelo Equivalente Eutrófico Abruptico Plinthico foi o que liberou maiores quantidades de fósforo para as plantas, comprovadas pelas maiores produções obtidas.

Através dos resultados apresentados nas Tabelas 7, 8 e 9, podemos inferir que os solos sofreram redução na percentagem de fósforo fixado, acarretada por uma saturação paulatina das suas capacidades de fixação de fósforo.

#### 4.2.1. Escolha do Valor "X"

Como pode ser visto na figura 2, o valor "X", para cada solo, apresenta-se bastante definido, sendo em torno de 100 ppm para os Podzólicos Vermelhos Amarelos Equivalentes Eutróficos Latossólicos e Abruptico Plinthico e de 150 ppm para o Cambissol Eutrófico com A fraco.

#### 4.3. Produção de *Sorghum bicolor* (L.) Moench, variedade TEY-101, em gramas de matéria seca, por vaso nos solos estudados

As produções em gramas, de matéria seca por vaso, são apresentadas nas Tabelas 10, 11 e 12, que correspondem às produções dos solos Cambissol Equivalente Eutrófico com A fraco, Podzólico Vermelho Amarelo Equivalente Eutrófico Latossólico e Podzólico Vermelho Amarelo Equivalente Eutrófico Abruptico Plinthico, respectivamente.

Na análise estatística, o ensaio foi altamente significativo, ao nível de 1% pelo teste F.

Para as diferenças mínimas significativas (d.m.s.), foi usado o teste de Tukey, aos níveis de 1% e 5%. Os valores de d.m.s. obtidos foram:

Cambissol - d.m.s. a 1% = 1,71, a 5% = 1,33

PUA Latossólico - d.m.s. a 1% = 2,48, a 5% = 1,93

PUA Abrupto - d.m.s. a 1% = 2,41, a 5% = 1,88.

Tabela 6. Percentagens de fixação de fósforo em Cambissol Eutrófico com A fraco, determinadas por WAUGH e FITTS (1966)

Tratamento	Fósforo Adicionado. ppm	Fósforo solúvel no Extrator Mehlich			Fósforo não		% Fixação de Fósforo
		ppm			Fixado. ppm	Fósforo	
		Repetição 1	Repetição 2	Repetição 3			
1	0	3,50	3,30	3,70	3,50	0,00	0,00
2	50	3,50	3,40	3,60	3,50	0,00	0,00
3	100	3,20	3,70	3,60	3,50	0,00	0,00
4	150	6,10	6,30	6,20	6,20	2,70	98,20
5	200	12,90	13,10	12,60	12,87	9,37	95,32
6	250	15,60	14,00	14,00	14,53	11,03	95,27

Tabela 7. Percentagens de fixação de fósforo em Podzólico Vermelho Amarelo Equivalente Eutrófico Latossólico, determinadas por WAUGH e FITTS (1966)

Tratamento	Fósforo Adicionado. ppm	Fósforo solúvel no Extrator Mehlich			Fósforo não		% Fixação de Fósforo
		ppm			Fixado. ppm	Fósforo	
		Repetição 1	Repetição 2	Repetição 3			
1	0	3,50	3,30	3,70	3,50	0,00	0,00
2	50	7,00	7,00	6,30	6,77	3,27	93,46
3	100	7,80	7,60	8,00	7,80	4,30	95,70
4	150	14,00	14,40	13,60	14,00	10,50	93,00
5	200	18,00	18,20	18,70	18,30	14,80	92,00
6	250	24,00	24,40	24,20	24,20	20,70	91,72

Tabela 8. Percentagens de fixação de fósforo em Podzólico Vermelho Amarelo Equivalente Eutrófico Abruptico Plinthico, determinadas por WAUGH e FITTS (1966)

Tratamento	Fósforo Adicionado. ppm	Fósforo Solúvel no Extrator de Mehlich			Fósforo não Fixado. ppm	% Fixação de Fósforo
		ppm	Média			
		Repetição 1	Repetição 2	Repetição 3		
1	0	3,50	3,00	3,17	0,00	0,00
2	50	6,80	6,90	6,80	3,77	92,46
3	100	7,00	8,30	7,87	4,70	95,30
4	150	14,00	16,20	14,73	11,56	92,29
5	200	19,60	22,00	20,87	17,70	91,15
6	250	24,60	29,00	26,07	22,90	90,84

Tabela 9. Percentagens de saturação das adsorções máximas, com respectivas quantidades de fósforo aplicado, relacionadas com as percentagens de produção

S O L O S	SATURAÇÃO (%)	P APLICADO (ppm)	PRODUÇÃO (%)
Cambissol	0	0	24,57
	25	74	59,71
	50	148	76,90
	75	222	86,00
	100	296	77,89
	125	370	100,00
PVA Latossólico	0	0	27,29
	25	64	51,85
	50	128	55,75
	75	192	68,23
	100	256	100,00
	125	320	77,19
PVA Abruptico	0	0	17,38
	25	51	97,31
	50	102	100,00
	75	153	85,31
	100	204	81,09
	125	255	99,05

Tabela 10. Produção de Sorgo em matéria seca no ensaio de vasos com doses crescentes de Fósforo, em Cambissol Eutrófico com A fraco

Tratamento	M a t é r i a S e c a (g/vaso)			
	Repetição 1	Repetição 2	Repetição 3	Média
1	0,90	1,00	1,10	1,00
2	2,00	2,10	3,20	2,43
3	3,10	2,70	3,60	3,13
4	3,90	3,00	3,60	3,50
5	3,40	3,50	2,60	3,17
6	4,60	3,60	4,00	4,07
D.M.S. TUKEY 1%	-	-	-	1,71
D.M.S. TUKEY 5%	-	-	-	1,33

Tabela 11. Produção de Sorgo em matéria seca no ensaio de vasos com doses crescentes de Fósforo, em Podzólico Vermelho Amarelo Equivalente Eutrófico Latossólico

Tratamento	M a t é r i a S e c a (g/vaso)			
	Repetição 1	Repetição 2	Repetição 3	Média
1	1,40	1,40	1,40	1,40
2	2,50	2,80	2,70	2,65
3	2,30	2,90	3,40	2,86
4	3,60	2,90	4,00	3,50
5	6,40	3,60	5,40	5,13
6	3,50	4,00	4,40	3,96
D.M.S. TUKEY 1%	-	-	-	2,48
D.M.S. TUKEY 5%	-	-	-	1,93

Tabela 12. Produção de Sorgo em matéria seca no ensaio de vasos com doses crescentes de Fósforo, em Podzólico Vermelho Amarelo Equivalente Eutrófico Abruptico Plinthico

Tratamento	M a t é r i a S e c a (g/vaso)			
	Repetição 1	Repetição 2	Repetição 3	Média
1	1,00	1,20	1,10	1,10
2	6,50	6,50	5,50	6,16
3	6,70	5,10	7,20	6,33
4	5,20	5,00	6,00	5,40
5	5,60	4,00	5,80	5,13
6	6,20	6,20	6,40	6,27
D.M.S. TUKEY 1%	-	-	-	2,41
D.M.S. TUKEY 5%	-	-	-	1,88

Através dos resultados de produção (Tabelas 9, 10, 11 e 12) dos três solos estudados, podemos ver que apenas a testemunha diferiu significativamente dos demais tratamentos, os quais não diferiram significativamente entre si, ao nível de 5% no Cambissol e no PVA Latossólico e aos níveis de 5% e 1% no PVA Abruptico. Estes resultados sugerem que, em torno de 25% das suas capacidades de adsorção máxima, os solos estudados liberem quantidades de fósforo suficientes para satisfazer as exigências da planta.

Estes resultados discordam dos apresentados por WOODRUFF e KAMPRATH (1965), porém MAGALÃES (1969), estudando solos da região costeira da Califórnia, MATTOS FERREIRA (1973), estudando solos do Estado do Rio Grande do Sul, verificaram comportamento semelhante aos dos solos pesquisados neste trabalho, embora as capacidades de adsorção daqueles fossem diferentes das dos solos aqui estudados.

#### 4.4. Relação entre a adsorção de fósforo e alguns componentes do solo

OLSEN e WATANABE (1957), relacionando a adsorção de fósforo com a área superficial das partículas do solo, não encontram diferen-

ças entre a influência dos diversos tipos de argila neste processo. Entretanto, COLEMAN (1944), LOW e BLACK (1947), RUSSEL e LOW (1954) e HEMALL (1957) destacaram a importância dos diferentes tipos de aluminossilicatos na retenção de fósforo.

Nos solos estudados, as mais altas adsorções máximas foram obtidas para os solos com mais elevados teores de argila e onde se presume, através do índice Ki, predomina a caulinita.

HEMWALL (1957), COLEMAN et alii (1960), TAYLOR et alii (1930) e SHERMAN (1971) atribuíram ao alumínio e ao ferro, em suas diferentes formas no solo, a sorção de fosfatos. No presente trabalho, foram encontradas correlações altamente significativas entre a adsorção máxima e teores de ferro livre ( $r=0,9973$ ) e alumínio livre ( $r=0,9956$ ). Os resultados encontrados são concordantes com a literatura consultada. Embora alguns trabalhos mostrem que a fixação do fósforo é predominantemente devida aos óxidos de alumínio (BROFIELD, 1964; MACKENZIE e AMER, 1964; SHUKLA et alii, 1971; LEAL e VELLOSO, 1973), HSU (1964) afirma que, em síntese, precipitação e adsorção seriam consequência do mesmo mecanismo - força de atração entre íons fosfato e íons ferro e/ou alumínio - dependendo, exclusivamente, da forma do cátion presente no momento da reação.

O presente trabalho, que estudou apenas três solos, não pode pretender se aprofundar em correlações entre fixação de fosfato e os fatores apontados como responsáveis pelo fenômeno. Contudo, algumas observações podem ser feitas.

De acordo com a literatura consultada, os fatores mais importantes na fixação de fosfato, além do conteúdo e qualidade da argila e teores de  $Al_2O_3$  e  $Fe_2O_3$  livres, são: Matéria Orgânica, Cálcio e Magnésio, pH e tempo de contato.

Foram encontradas correlações altamente significativas entre a adsorção máxima, os teores de matéria orgânica ( $r=0,9122$ ), Cálcio ( $r=0,9223$ ) e Magnésio ( $r=0,9738$ ). (Tabela 13).

Os três solos aqui estudados apresentaram potenciais de hidrogênio praticamente iguais, não sendo, assim, possível qualquer inferência neste sentido; o mesmo se pode dizer com relação ao tempo de contato, que, após escolhido, não sofreu modificação.

Os resultados aqui expostos nas Tabelas 4 e 9 mostram que

os solos apresentaram maiores adsorções máximas, receberam maiores quantidades de fósforo e exigiram, também, maiores quantidades desse elemento para suas produções máximas com o sorgo.

Tabela 13. Relações entre as adsorções máximas e algumas características dos solos

Características do Solo	Equação de Regressão	Coefficiente de Correlação
b x Argila. %	$Y = 199,27 + 2,15$	0,9978
b x $Fe_2O_3$ livre %	$Y = 194,57 + 18,80$	0,9973
b x $Al_2O_3$ livre %	$Y = 186,03 + 8,54$	0,9956
b x Mat.Org.%	$Y = 182,69 + 74,08$	0,9122
b x $Ca^{2+}$	$Y = 210,37 + 6,08$	0,9223
b x $Mg^{2+}$	$Y = 200,98 + 25,66$	0,9738
b x pH	$Y = 341,59 - 12,17$	-0,0932



## 5. CONCLUSÕES

Dos resultados alcançados neste trabalho, as seguintes conclusões foram evidenciadas:

- A Isoterma de Langmuir descreveu a adsorção de fósforo nos solos, quando as concentrações de equilíbrio foram iguais ou inferiores a  $2,26 \times 10^{-4}$  M em P.
- As constantes de seletividade (K) mostraram-se muito baixas, demonstrando, assim, uma baixa afinidade de solo com o íon fosfato.
- Os solos estudados apresentaram baixas capacidades máximas de adsorção, podendo-se inferir que as baixas concentrações de fósforo podem ser devidas ao baixo teor de fósforo total nos solos.
- Os valores "X" determinados graficamente pelo método de WAUGH e FITTS (1966), para os solos estudados, seguiram a mesma tendência das adsorções máximas calculadas pela Isoterma de Langmuir.
- As adsorções máximas, calculadas através da equação de Langmuir, apresentaram altas correlações com os teores de argila,  $Al_2O_3$  e  $Fe_2O_3$ , matéria orgânica, cálcio e magnésio.
- Os solos testados liberaram fósforo suficiente para o de-

desenvolvimento do sorgo, em casa de vegetação, a partir dos teores em P correspondentes a 25% das adsorções máximas.

## 6. S U M M A R Y

The maximum phosphate adsorption was determined from superficial samples collected at an average depth of 20 centimetres from 2 Alfisols and one Inceptisol soils at Mossoró, State of Rio Grande do Norte.

Laboratory determination and green house experiments were effected in order to observe the importance of Langmuir Isotherm in the description of the adsorbed phosphate and its relation to availability for plants. At the laboratory experiments, besides Langmuir Isotherm Waugh & Fitts method was also utilized to test the maximum capacity of phosphates adsorption by the studied soils.

The Langmuir Isotherm described the phosphate adsorption when the balancing solutions concentrations were equal or smaller to  $2,26 \times 10^{-4}$  M of phosphorus. The maximum adsorption for the studied soils ranged from 204,08 to 294,12 Mg P/g of soil.

The existence of high correlations between the soils maximum adsorption and the quantity of clay, aluminium Oxids and free iron, organic matter, calcium and magnesium were verified.

The method recommended by Waugh & Fitts was utilized in order to obtain the "X" value described by those authors as the point of maximum adsorption. For Inceptisol an "X" value around 150 ppm soil phosphorus was obtained, while for Alfisols "X" value was evident around 100 ppm.

The production of dry matter by *Sorghum bicolor* (L.) Moench was compared to the phosphorus added to the soils, according

to their maximum adsorption. Results demonstrated that soils with higher maximum adsorption demand higher quantities of phosphorus for maximum sorghum production.

Inceptisol demonstrated greater capacity of phosphate fixation, when compared to the other soils studied.

## 7. LITERATURA CITADA

- ANASTÁCIO, M. L. A., 1968 - Fixação de fósforo em solos brasileiros, Equipe de Pedologia e Fertilidade do Solo, M.A. - Bol. Téc. nº 4, Rio de Janeiro.
- BACHE, B. W., 1964 - Aluminium and iron phosphate studies relating to soils. J. Soil Sci., Oxford, 15(1):110-116.
- BACHE, B. W. e E. G. WILLIAMS, 1971 - A phosphate sorptions index for soils. J. Soil Sci., Oxford, 23(3):291-301.
- BARROW, G. M., 1961. Physical Chemistry. McGraw-Hill Book Co. Inc. New York.
- BHAT, K.K.S. e S. BOUYER, 1968 - Influence de la matière organique sur le phosphore isotopiquement diluable des quelque types de sols tropicaux. In Symposium on Isotopes and Radiations in Soil organic - Matter studies, Vienna. Proceedings.
- BINGHAM, F. T., 1962 - Chemical Soil test for available phosphorus. Soil Sci., Baltimore, 94(2):87-95.
- BITTENCOURT, V. C. e E. ZAMBELLO Jr., 1973 - Comportamento do fósforo em solos tropicais. I. Isotermas de Adsorção. Boletim BC-012. CENA. Piracicaba.
- BITTENCOURT, V.C. e E. ZAMBELLO Jr., 1975 - Comportamento do fósforo em solos tropicais. II. Cinética de retenção. Boletim BC-032, CENA. Piracicaba.
- BITTENCOURT, V. C. e E. ZAMBELLO Jr., 1975 - Comportamento do fósforo em solos tropicais. III. Reações de retenção, Boletim BC-033, CENA. Piraci

caba.

- BITTENCOURT, V. C. e M.N.S. MONTANHEIRO, 1975 - Retenção do Fósforo (<sup>32</sup>P) por óxidos de ferro sintéticos. Boletim BC-026. CENA. Piracicaba.
- BITTENCOURT, V. C. e V. B. GOMES, 1975 - Avaliação da disponibilidade do P de fosfatos de Fe e de Al. Boletim BC-035. CENA. Piracicaba.
- BLACK, C. A., 1968 - Soil plant relationships. 2a. ed. John Wiley & Sons, Inc. New York.
- BRAGA, J. M., 1971 - Fatores que afetam a adsorção do fosfato. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, MG.
- BRAGA, J. M., 1971.a - Adsorção de anions. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, MG.
- BRAGA, J. M. e B.V. DEFELIDO, 1972.a-Relação entre forma de fósforo inorgânico, fósforo disponível e material vegetal em solos sob vegetação de cerrado: I - Trabalho de laboratório, Viçosa, M.G. Revista Ceres, 19 (102):124-136.
- BRAGA, J.M. e B.V. DEFELIPO, 1972.b- Relação entre forma de fósforo inorgânico, fósforo disponível e material vegetal em solos sob vegetação e cerrado: II - Trabalhos de estufa. Viçosa, M.G. Revista Ceres, 19 (104) 248-260.
- BRASIL. Divisão de Pesquisa Pedológica - DNPEA - M.A. - Levantamento exploratório-Reconhecimento de Solos do Estado do Rio Grande do Norte. Bol. Téc. nº 21.
- BROMFIELD, S.M., 1964 - Relative contribution of iron and aluminium in phosphate sorption by acid surface soils. Nature, London, 201:321-322.
- BUCKMAN, H. O. e N. C. BRADY, 1974 - Natureza e propriedades dos solos 3a. ed. Rio de Janeiro. Livraria Freitas Bastos.
- CALVERT, D. V.; H.F. MASSEY e W.A. SEAY, 1960 - The effect of exchangeable calcium on the retention of phosphorus by clay fraction of soils of the Memphis Catena. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., Ann Arbor, 24:333 - 336.
- CATANI, R.A., 1947 - Contribuição ao estudo dos fosfatos, sua dosagem, extração e distribuição nos solos do Estado de São Paulo. Piracicaba. (Tese - ESALQ).
- CATANI, R. A. e D. PELLEGRINO, 1957 - A fixação de fósforo em alguns solos do Estado de São Paulo, estudada com o auxílio de fósforo radioativo

- vo  $^{32}\text{P}_{15}$ . Piracicaba, Revista de Agricultura, 32(4):237-252,
- CATANI, R.A. e D. PELLEGRINO, 1960 - Avaliação da capacidade de fixação de fósforo, pelo solo. Anais da E.S.A. "Luiz de Queiroz". Piracicaba, 17(271):19-28.
- CATANI, R.A. e N.A. GLÓRIA, 1964 - Evaluation of the capacity of phosphorus fixation by the soils through the isotopic exchange using  $^{32}\text{P}_{15}$ . Anais da E.S.A. "Luiz de Queiroz". Piracicaba, 21:230-237.
- CATANI, R.A. e D.C. BATAGLIA, 1968 - Formas de ocorrência do fósforo no solo latossólico roxo. Anais da E.S.A. "Luiz de Queiroz". Piracicaba, 25:99-119.
- CHANG, S.C. e M.L. JACKSON, 1957 - Solubility product of iron phosphate. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., Ann Arbor, 21:265-269.
- COLEMAN, N.T.; J.T. THORUP e W.A. JACKSON, 1960 - Phosphate sorption reaction that involve exchangeable Al. Soil Sci., New Brunswick, N.J. 90(1):1-7.
- COLEMAN, R., 1944.a - Phosphorus fixation by the coarse and fine clay fractions of Kaolinitic and Montmorillonitic clays. Soil Sci., New Brunswick, N. J., 58:71-77.
- COLEMAN, R., 1944.b - The mechanism of phosphate fixation by Montmorillonitic and Kaolinitic clays. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., Ann Arbor, 9:72-78.
- DAVIS, L. F., 1935 - Sorption of phosphates by non calcareous Hawaiian Soils. Soil Sci. 40:129-158.
- DE DATTA, S.K., 1961 - Adsorption of phosphate ion by hydrogen derivative of indian montmorillonite (Kashmir bentonite). Soil Sci., New Brunswick, N.J., 92:117-119.
- DE DATTA, S.K.; R.L. FOX e G.D. SHERMAN, 1963 - Availability of fertilizer phosphorus in three latosols of Hawaii. Agron.J., Madison, 55 (4) : 311-313.
- DEAN, L.A., 1949 - Fixation of soil phosphorus. Adv. Agron., 1:391-411.
- ELLIS Jr. R. e E. TRUOG, 1955 - Phosphate fixation by montmorillonite Soil Sci. Soc. Amer. Proc., Ann Arbor, 19(4):451-454.
- ESTRADA, J.A., 1971 - Mineralogical and chemical properties of peruvian - acid tropical Soils. Riverside, University of California. (PhD. Soils Thesis, University of California, Riverside).

- FASSBENDER, H. W., 1969.a - Retencion y transformation de fosfatos in 8 latosoles de la amazonia del Brazil. Fitotecnia Latinoamericana, 6:115-126.
- FASSBENDER, H. W., 1969.b - Phosphorus fixation in tropical soils. Agri. Digest, nº 18.
- FERREIRA, M. E., 1973 - Estudo sobre a fixação de fosfatos nos latossolos roxo e vermelho escuro - fase arenosa de Jaboticabal. (Tese de Doutorado - F.M.V.A. de Jaboticabal).
- FRANKLIN, W. T. e H.M. RETSENAUER, 1960 - Chemical characteristics of soil related to phosphorus fixation and availability. Soil Sci., Baltimore, 90:192-200.
- GLASSTONE, S. e D. LEWIS, 1960 - Elements of Physical Chemistry - D. Van Nostrand Co. Inc. New Jersey.
- GUNARY, D., 1970 - A new adsorption isotherm for phosphate in soil. J. Soil Sci., Oxford, 21(1):72-77.
- GUTNIK, V.; J. BALCAR; H. BEHRENS e E. ACEVEDO, 1967 - Influência del pH sobre la fijacion de fosforo em suelos derivados de cenizas volcanicas. Agric. Tecn., 27(4):141-143.
- HASEMAN, J.F.; E.H. BROWN e C.D. WIITT, 1950 - Some reactions of phosphate with clays and hidrous oxides of iron and aluminium. Soil Sci., New Brunswick, N.J., 70:257-271.
- HECK, A. F., 1943 - Phosphate fixation and penetrations in soils. Soil, Sci. New Brunswick, N.J. 37:343-355.
- HEMWALL, J.B., 1957 - The fixations of phosphorus by soils. Adv. in Agron., 9:95-112.
- HIBBARD, P.L., 1935 - Factors influencing phosphate fixations in soils. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., Madison, 28:337-358.
- HSU, P.H. e M.L. JACKSON, 1960 - Inorganic phosphate transformations by chemical weathering in soils as influenced by pH. Soil Sci., 90:16-24.
- HSU, P.H. e D.A. RENNIE, 1962 - Reactions of phosphate in aluminum-Systems I. Adsorption of phosphate by x-ray amorphus "aluminum hydroxide". II Precipitation of phosphate by exchangeable aluminum on a cation exchange resin. Can J. Soil Sci., Ottawa, 42: 197-221.
- HSU, P.G., 1964 - Adsorption of phosphate by aluminum and iron in soils. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., Madison, 28:474-478.
- HSU, P.H., 1965 - Fixation of phosphate by aluminum and iron in acid soils.



- Soil Sci., New Brunswick, N.J., 99(6):398-402.
- HUFFMAN, E.O., 1962 - Reaction of phosphate in soil; recent reasearch by TVA. Proc. Fertil. Soc., London, 71:5-35.
- JUO, A.S.R. e B.G. ELLIS, 1968 - Chemical and physical proprieties of iron and aluminum phosphates and their relation to phosphorus availability Soil Sci. Soc. Amer. Proc., Ann Arbor, 32:216-221.
- KAFKAFI, V.; A.M.POSNER e J.P. QUIRK, 1967 - Desorption of phosphate from Kaolinite. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., Ann Arbor, 31(3):348-353.
- KAMPRATH, E.J., 1961 - Agronomy Journal, 59:25-27.
- KAMPRATH, E.J., 1970 - Exchangeable aluminum as a criterion for liming leached mineral soils. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 34:252-254.
- KARIM, A. e D.H. KHAN, 1955 - Relationships between pH an different forms of phosphorus in some soils of east Pakistan. Soil Sci., Baltimore, 80:229-233.
- KELLY, J.B. e A.R. MIDGLEY, 1943 - Phosphate fixation - an exchange of phosphate an hidroxyl ions. Soil Sci., New Brunswick, N.J., 55:167-176.
- KITTRICK, J. A. e M. L. JACKSON, 1956 - Electron microscope observations of the reactions of phosphate with minerals, leading to a unified theory of phosphate fixation in soils. J.Soil Sci., Oxford, 7(1):81-90.
- KUO, S. e E.G. LOTSE, 1972 - Kinetics of phosphate adsorption by calcium - carbonate and Ca-Kaolinite. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 36:725-729.
- KURTZ, L. T.; E. TURK e R. BRAY, 1946 - Phosphate adsorption by Illinois soils. Soil Sci., 61:111-124.
- LARSEN, S., 1966 - The solubility of phosphate in a calcareous soils. J.Soil Sci., 17:121-126.
- LARSEN, S., 1967 - Soil phosphorus. In: NORMAN, A.G., ed. Adv. Agron., New York, Academic Press, 19:151-210.
- LEAL, J.R. e A.C. VELLOSO, 1973 - Adsorção de fosfato em latossolo sob vegetação de cerrado. Pesq. Agropec. Bras., Série Agron., 8:81-88.
- LEAL, J.R. e A.C. VELLOSO, 1973 - Dessorção do fosfato adsorvido em latossolos sob vegetação de cerrado. II - Reversibilidade da isoterma de adsorção de fosfato em relação ao pH da solução de equilíbrio. Pesq. Agropec. Bras., Série Agron., 8:89-92.
- LINDSAY, W. L.; A.W. FRAZIER e H.F.STEPHENSON, 1962 - Identification of reaction products from phosphate fertilizer in soil. Soil Sci, Soc. Amer.

- Proc., Ann Arbor, 26:446-452.
- LOURENÇO, S., 1973 - Adsorção e Desorção do fósforo em solos do Estado do Paraná. Piracicaba, ESALQ/USP (tese de Doutorado).
- LOW, P.F. e C.A. BLACK, 1947 - Phosphate induced decomposition of Kaolinite Soil Sci. Soc. Amer. Proc., Madison, 12(2):180-184.
- MACIEL, C.A.C., 1974 - Estudo sobre a fixação de fosfatos em alguns solos do Paraguai. Piracicaba, ESALQ/USP (Tese de Mestrado).
- MACKENZIE, A.F. e S.A. AMER, 1964 - Reactions of iron, aluminium and calcium phosphates in six Ontario Soils. Pl. Soil, The Hague, 21:17-25.
- MAGALHÃES, A.F., 1969 - Phosphorus sorption by California coastal soils as related to P extracted with Olsen and Bray reagents, P absorption by and growth of tomato plants. Riverside, University of California (Thesis (M. S.) soils).
- MARSHALL, E. C., 1964 - The physical chemistry and mineralogy of soils. New York, John Wiley & Sons.
- MATTOS FERREIRA, N. C., 1973 - Adsorção de fósforo em solos do Rio Grande do Sul e sua relação com a disponibilidade para as plantas. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Tese de Mestrado).
- MEIRA SÁ Jr.; J.P.; I.F.GOMES e A.L. VASCONCELLOS, 1968 - Retenção de fósforo em solos da Zona da Mata de Pernambuco. Instituto de Pesquisa e Experimentação Agropecuárias do Nordeste. EPE. M.A. Bol. nº 13.
- MELLO, F.A.F., 1970 - Um método para avaliar a capacidade de fixação de fósforo pelo solo, empregando o  $^{32}\text{P}_{15}$ . Anais da E.S.A. "Luiz de Queiroz", 27 : 347-352.
- MELLO, F.A.F.; M.O.C. BRASIL SOBRº; S. ARZOLLA; A. COBRA NETO e R.I.SILVEIRA, 1972 - Fertilidade do Solo. Piracicaba, ESALQ, Deptº de Solos e Geo-
- MENDES, C.T., 1950 - Adubações fosfatadas. Piracicaba, Rev. da Agric., 25 (1-2): 1-22.
- MOURA FILHO, W., 1970 - Studies of a latossol roxo (Entrustox) in Brazil: Clay mineralogy, micromorfology, effect of ion release, and phosphate reaction. Raleigh, North Carolina, North Carolina State University (Thesis (PhD.)).
- MULJADI, D.; A.M. POSNER e J.P. QUIRK, 1966 - The mechanism of phosphate adsorption by kaolinite, gibbsite and pseudo bohemite. J. Soil Sci., Oxford

- 17(2):212-247.
- MUNSELL SOIL COLOR CHARTS, 1954 - Munsell color company, Inc, Baltimore, U. S.A.
- OLSEN, S.R. e F.S.A. WATANABE, 1957 - A method to determine a phosphorus adsorption maximum of soils measured by Langmuir isotherm. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., Madison, 21(2):144-149.
- PIMENTEL GOMES, F., 1963 - Curso de Estatística Experimental. 2a. ed, E. S. A. "Luiz de Queiroz", Piracicaba - SP.
- PRATT, P. F., 1966 - Química do Solo. Curso intensivo nº 1. Tradução de L. Vettori e A. Nascimento. Convênio MA/DPFS-USAID/BR. Resource Survey Pro- Ag. 512-15-120-249. Mimeografado. 87p.
- RACZ, G.J. e R.J. SOPER, 1967 - Reaction products of orthophosphates in soils containing varying amounts of calcium and magnesium. Can. J. Soil Sci., Ottawa, 48:265-269.
- RAGLAND, J.L. e W.A. SEAY, 1957 - The effects of exchangeable calcium on the retention and fixation of phosphorus by clay fractions of soil. Soil Sci. Amer. Proc., Ann Arbor, 21:261-264.
- RAMULU, U.S.S.; P.F. PRATT e A.L. PAGE, 1967 - Phosphorus fixation in relation extractable iron oxides and mineralogical composition. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 31:193-199.
- REEVE, N.G. e M.E. SUMNER, 1970 - Effects of aluminium toxicity and phosphorus fixation on crop growth an oxisols in Natal. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 34:263-267.
- RODRIGUEZ, O.; C. SANCHEZ, 1968 - Fijacion del fósforo por cuatro tipos de suelos de Sabana, Oriente Agrop., 1(1)23-33.
- ROMINE, D.S. e W.H. METZGER, 1939 - Phosphorus fixation by horizons of various soil types in relation to dilute acid extractable iron and aluminum. J. Am. Soc. of Agron., 31:99-108.
- RUSSEL, G.C. e P. F. LOW, 1954 - Reaction of phosphate with kaolinite in dilute solution. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., Madison, 8(1):22-25.
- SAUCHELLI, V., 1965 - Phosphates in agriculture. Reinhold Publishing Corporation, New York.
- SEN GUPTA, M. B. e A. H. CORNFIELD, 1962 - Phosphorus in calcareous soil. I. The inorganic phosphate fractions and their relation to the amount of calcium carbonate present. J. Sci. Fd. Agric., London, 13:652-658.

- SHERMAN, G.D., 1971 - Phosphorus availability in tropical soils. Agri. Digest, Bruxelas, 23:12-22.
- SHULA, S.S.; J.K. SYERS; J. D. H. WILLIAMS; D.E. ARMSTRONG e R.F. HARRIS  
1971 - Sorption of inorganic phosphate by lake sediments. Soil Sci., Madison, 35:244-249.
- STOUT, P.R., 1939 - Alterations in the crystal structures of clay minerals as a result of phosphate fixation. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., Ann Arbor, 4:177-182.
- STRONG, J. e G.J. RACZ, 1970 - Reaction products of applied orthophosphates in some Manitoba soils as affected by soil calcium and magnesium content and time of incubation. Soil Sci., New Brunswick, N.J., 110:258-262.
- SYERS, J. K.; T.D. EVANS; J.D.H. WILLIAMS e J. MURDOCK, 1971 - Phosphate sorption parameters of representative soils from Rio Grande do Sul, Brasil. Soil Sci., Baltimore, 112(4):267-275.
- TAYLOR, A.W., 1963 - Potassium and ammonium taranakites, amorphous aluminium phosphate, and variscite as sources of phosphate for plants. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., Madison, 27(2):148-151.
- TISDALE, S. L. e W.L. NELSON, 1970 - Soil fertility and fertilizer. 2a. ed. The MacMillan Company. Hong Kong.
- UDO, E.J. e F.O. UZU, 1972 - Characteristics of phosphorus adsorption by some Nigerian soils. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 36:879-883.
- VASCONCELOS, C.A., 1972 - Fósforo: fracionamento e adsorção. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa - MG.
- VASCONCELOS, C.A., 1973 - Contribuição para o estudo de fósforo em dois latossolos do Estado de Mato Grosso. Univ. Rural Estadual de Minas Gerais - UREMG - Viçosa - MG. Tese (M.S.).
- VELLOSO, A.C.X., 1969 - Phosphate solubility in andosols and oxisols. Riverside, University of California. (Thesis (M.S.) - soils).
- VETTORI, L., 1969 - Métodos de análise de solo. Equipe de Análise de solos. EPE - M.A. Bol. nº 7. Rio de Janeiro.
- VOLK, V.V. e E. O. McLEAN, 1963 - The fate of applied phosphorus in four Ohio soils. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., Ann Arbor, 27:58-8.
- WAUGH, D. L. e J. W. FITTS, 1966 - Estudos para interpretação de análises de solo: de laboratório e em vasos. International Soil Testing, Bol. Tec. nº 3.

WOODRUFF, J. R. e E. J. KAMPRATH, 1965 - Phosphorus adsorption maximum as measured by the Langmuir isotherm and its relationship to phosphorus availability. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., Madison, 29(2):148-150.

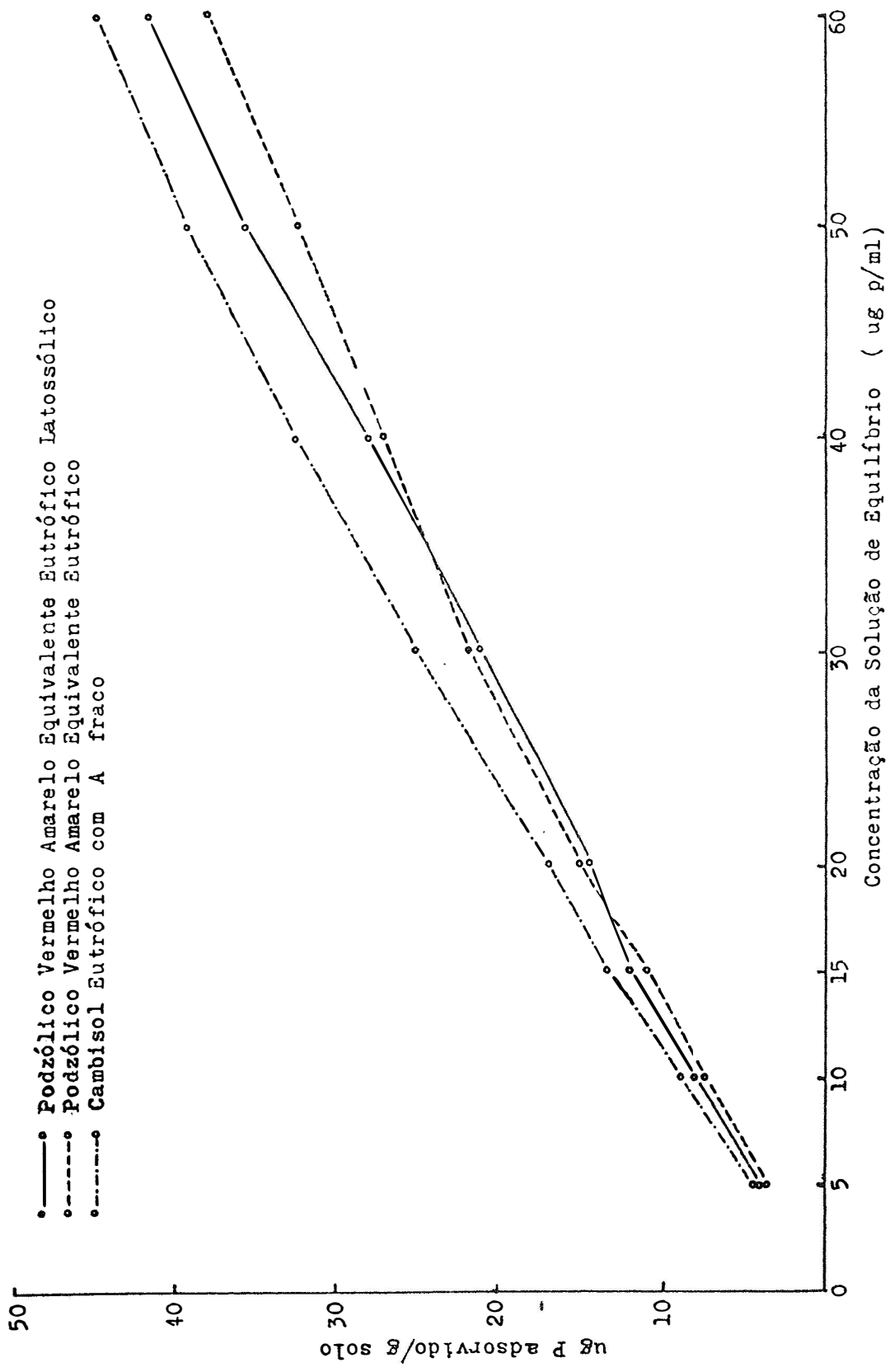


Figura 1. Isothermas de Adsorção

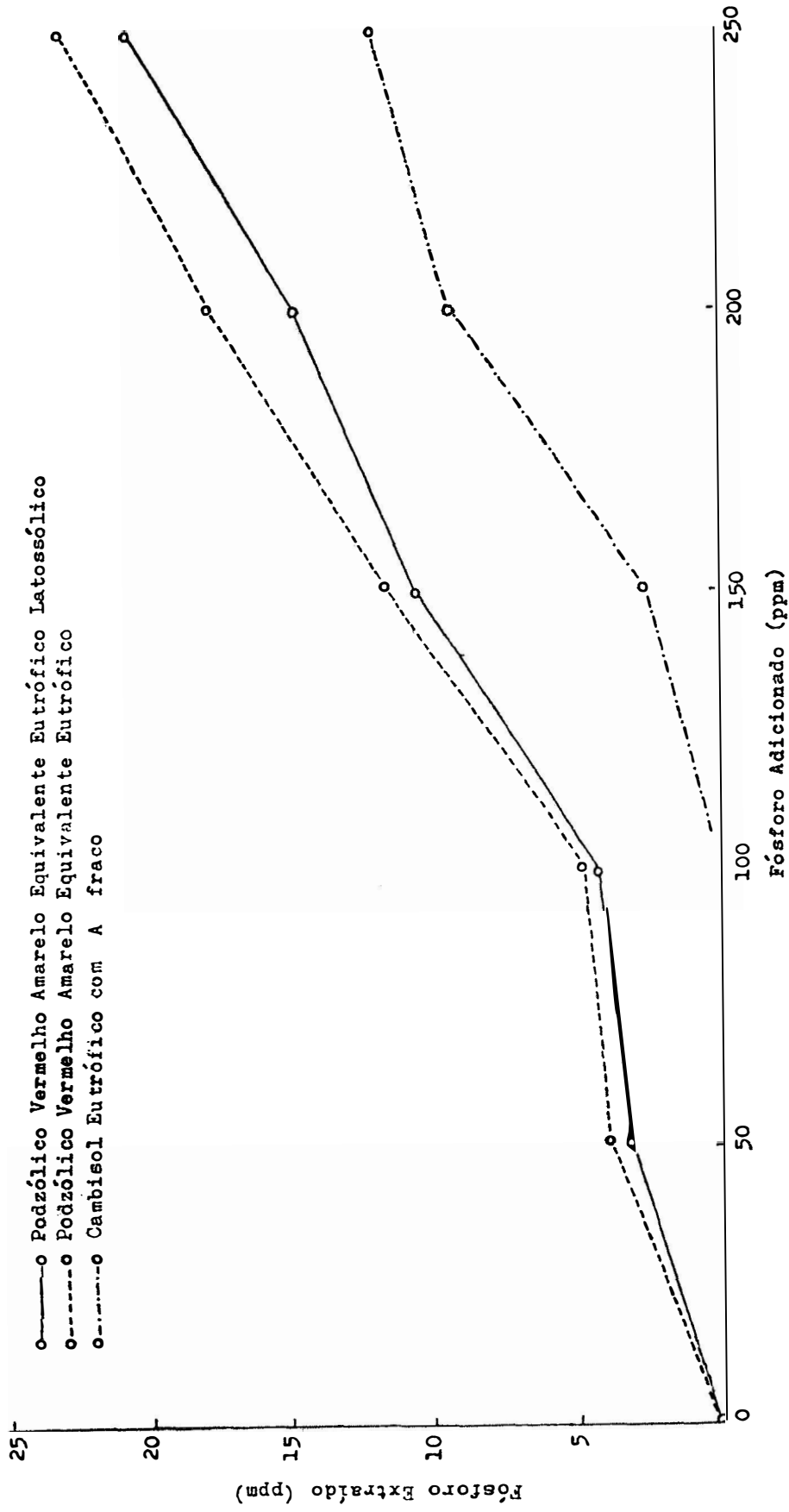


Figura 2. Curvas de Extração do Fósforo