

RAYANA PIRES MARQUES

DISPONIBILIDADE E FRACIONAMENTO DO FÓSFORO EM SOLOS AFETADOS POR
SAIS E CULTIVADOS COM SORGO FORRAGEIRO NO SERTÃO DO PAJEÚ

Serra Talhada-PE

2014

RAYANA PIRES MARQUES

DISPONIBILIDADE E FRACIONAMENTO DO FÓSFORO EM SOLOS AFETADOS POR
SAIS E CULTIVADOS COM SORGO FORRAGEIRO NO SERTÃO DO PAJEÚ

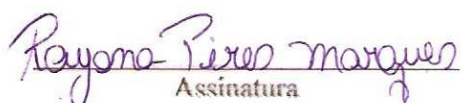
Dissertação apresentada à Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, para obtenção do título de Mestre em Produção Vegetal.

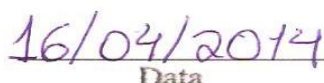
Orientador: Prof. , Dr. Alexandre Tavares
da Rocha

Serra Talhada-PE

2014

Com base no disposto na **Lei Federal N° 9.610**, de 19 de fevereiro de 1998. [...] Autorizo para fins acadêmicos e científico a UFRPE/UAST, a divulgação e reprodução TOTAL, desta Dissertação “Disponibilidade e fracionamento do fósforo em solos afetados por sais cultivado com sorgo forrageiro no Sertão do Pajeú”. Sem ressarcimento dos direitos autorais, da obra, a partir da data abaixo indicada ou até que manifestação em sentido contrário de minha parte determine a cessação desta autorização.


Assinatura


Data

Ficha catalográfica

M357d Marques, Rayana Pires.
Disponibilidade e fracionamento do fósforo em solos afetados por sais cultivado com sorgo forrageiro no Sertão do Pajeú. / Rayana Pires Marques. – 2014.
50 f.: il.
Orientador: Alexandre Tavares da Rocha.
Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Universidade Federal Rural de Pernambuco. Unidade Acadêmica de Serra Talhada, Serra Talhada, 2014.
Referências.
1. Fosfato - fracionamento. 2. Salinidade. 3.Sorghum sudanense I. Rocha, Alexandre Tavares da, Orientador. II. Título.

CDD 631


RAYANA PIRES MARQUES

DISPONIBILIDADE E FRACIONAMENTO DO FÓSFORO EM
SOLOS AFETADOS POR SAIS CULTIVADO COM SORGO FORRAGEIRO
NO SERTÃO DO PAJEÚ

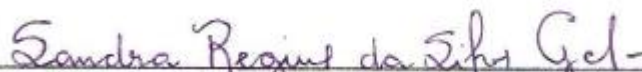
Dissertação apresentada à Universidade Federal Rural de Pernambuco, Unidade Acadêmica de Serra Talhada - UAST, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal para obtenção do título de Mestre em Produção Vegetal.

APROVADA em: 26/02/2014.

Banca Examinadora



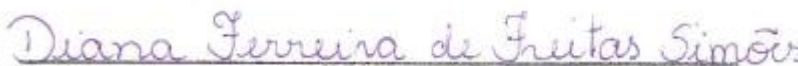
Prof. Dr. Alexandre Tavares da Rocha – UAST/UFRPE
Orientador



Prof.ª Dr. Sandra Regina da Silva Galvão – IFSertão -PE



Prof. Dr. Josimar Bento Simplicio – UAST/UFRPE



Prof.ª Dr. Diana Ferreira de Freitas Simões – UAST/UFRPE

À minha família, sempre ao meu lado, apoiando os meus objetivos em todos os momentos, contribuindo para minha formação pessoal e profissional. Em especial a minha avó Marluce Araújo de Souza, pela paciência, compreensão e carinho. Educando-me por toda a vida.

Dedico

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela oportunidade de concluir esta obra.

Ao meu orientador, o professor Alexandre Tavares da Rocha, pela confiança, paciência, dedicação, incentivo e orientação fundamental a concretização dessa pesquisa.

Ao meu irmão, Petrus Marques, pelas valiosas contribuições prestadas.

Aos meus amigos, pelo apoio incondicional.

Aos colegas de laboratório pelo apoio prestado nas análises laboratoriais e condução do experimento em campo. Especialmente a Ygor, Renata, Nenerram, Rayles, Matheus e Robson.

A Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), através do Programa de Pós-graduação em Produção Vegetal (PPGPV) pela infraestrutura, apoio financeiro e oportunidade de realizar o mestrado.

À Fundação de Amparo a Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE) pela bolsa concedida durante o período do curso.

Ao Instituto Agrônomo de Pernambuco (IPA), em especial ao pesquisador Dr. José Nildo Tabosa pelas sementes cedidas.

A todos que não foram mencionados, e que de alguma forma auxiliaram na realização deste trabalho, meus agradecimentos.

Não confunda jamais conhecimento com sabedoria. Um o ajuda a ganhar a vida; o outro a
construir uma vida.

Sandra Carey

RESUMO

O estudo das frações disponíveis do fósforo merece atenção no manejo da fertilidade de solos afetados por sais no semiárido, uma vez que esse elemento muitas vezes é encontrado em teores adequados, porém nem sempre na sua forma disponível. Assim, objetivo do trabalho foi avaliar os extratores mais eficientes do P-disponível, identificar as frações de P predominantes nesses solos e a produtividade do sorgo forrageiro cultivado em solos afetados por sais mediante a adubação fosfatada. Os experimentos foram conduzidos no semiárido pernambucano, em condições de vasos e campo. Os ensaios foram montados em blocos completos casualizados (DBC), onde o Sorgo da variedade Sudão foi submetido a cinco doses de fósforo (0, 30, 60, 90 e 120 kg ha⁻¹ de P₂O₅), com quatro repetições. Nos vasos o experimento foi montado em esquema fatorial 5x4, correspondendo as cinco doses de fósforo e 4 Cambissolos coletados em diferentes áreas do município de Serra Talhada – PE. Foi realizada a caracterização química e física desses solos para a profundidade de 0-20 cm. A coleta do sorgo foi realizada no período de emborrachamento da cultura, nesta ocasião a parte aérea foi seca em estufa, pesada e triturada para a quantificação do teor de P, também conforme métodos da Embrapa. O P-disponível no solo foi determinado pelos seguintes extratores: Mehlich-1 (0,05M HCl+ 0,0125M H₂SO₄), Olsen (0,5 M NaHCO₃), Chang & Jackson (0,1 M NaOH+ 1 M NaCl), , Saunder (0,1 M NaOH), Soltanpour (1M NH₄HCO₃+ 0,005M DTPA), e “Pox” (0,175 M oxalato de amônio +0,1 M ácido oxálico). Foi realizado ainda o fracionamento químico do P segundo Olsen & Sommers (1982). As variáveis estudadas foram submetidas à análise de variância e ajustadas, quando possível, modelos de regressão para o P-recuperado pelos extratores ou pela planta em função das doses de P aplicadas. Foram realizadas ainda, correlações entre diferentes frações de P e extratores, bem como entre frações e as características dos solos. Os extratores ácidos foram os que conseguiram extrair maiores teores de P, porém foram os extratores neutro e moderadamente alcalino (Olsen e Soltampour) que mostraram teores de P disponível mais próximo do recuperado pela planta. Os resultados do fracionamento mostraram que os solos apresentaram maiores teores de P no compartimento não-lábil, seguido pelas frações pouco lábeis e lábeis. Em campo, e em vasos (solo 1), a fração predominante é a HCl-P, já nos solos 2 e 3, as frações de P residual é que aparecem em maiores porcentagens e no solo 4 a fração predominante foi CBD-P. Há evidências de participação das frações consideradas menos lábeis no suprimento de P para o sorgo, no campo e solo 1, em função da correlação do P absorvido pela planta com essas frações. A produtividade ficou em torno de 2,5 Mg ha⁻¹ de massa seca, abaixo da média esperada pela cultura, comportamento que também ocorreu com as variáveis biométricas.

Palavras-chave: Salinidade; Extratores; frações de fósforo;

ABSTRACT

The study of available fractions of phosphorus deserves attention in fertility management of salt affected soils in semiarid region, since this element is often found in adequate levels, but not always in its available form. Thus, the aim of this work was to evaluate the most efficient extractants available-P, identify the predominant fractions of p in these soils and productivity of forage sorghum grown in salt affected soils by phosphate fertilization. The experiments were conducted in semi-arid region of Pernambuco, in pots and field conditions. The trials were conducted in randomized complete block design (RBD), where the variety of sorghum Sudan was subjected to five levels of phosphorus (0, 30, 60, 90 and 120 kg ha⁻¹ P₂O₅) with four replicates. In the vessel experiments a 5x4 factorial scheme was used, corresponding to the five levels of phosphorus and 4 Cambisols (inceptisols) collected in different areas of the municipality of Serra Talhada – PE. Chemical and physical characterization of these soils to depth of 0-20 cm was performed. The collection of sorghum was conducted from booting culture, this time the shoot was kiln dried, weighed and crushed to quantify the content of P, also according to Embrapa methods. The P- availability in the soils was determined by the following extractants: Mehlich-1 (0,05M HCl + 0,0125M H₂SO₄), Olsen (0,5 M NaHCO₃), Chang & Jackson (0,1 M NaOH + 1M NaCl), Saunder (0,1M NaOH), Soltanpour (1M NH₄HCO₃ + 0,005M DTPA), and “Pox” (0,175 M amônio oxalate + 0,1M Oxalic Acid). Chemical fractionation of P was also performed according to Olsen & Sommers (1982). The variables were subjected to analysis of variance and adjusted, when possible, to regression models for P reclaimed by the extractants or the plant as a function of P rates applied. Correlations between different P fractions and extractants, as well as between fractions and soil characteristics were also carried out. The acid extractants were those who managed to extract higher levels of P, but neutral and moderately alkaline extractants (Olsen and Soltampour) yielded P levels closest to those recovered by the plants. According the fractionation, that soils presented higher levels of P in the non-labile compartment, followed by less labile and labile. In the field and in pots (soil 1), the predominant fraction is the HCl-P, as in soils 2 and 3, the fractions of residual P appears in greater percentages and in soil 4 the predominant fraction is CBD-P. There is evidence for the participation of less labile fractions in P supply for sorghum in field and soil 1, according to the correlation of P uptake by plants with these fractions. The sorghum productivity was about 2.5 Mg ha⁻¹ dry weight, lower than the mean expected for the culture. Such behavior also occurred with the biometric variables.

Keywords: salinity, extractants, phosphorus fractions.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Diferença de teor médio de P disponível recuperado pelos extratores em função das doses de fósforo no solo 1.....	27
Figura 2	Diferença de teor médio de P disponível recuperado pelos extratores em função das doses de fósforo no solo 2.....	28
Figura 3	Diferença de teor médio de P disponível recuperado pelos extratores em função das doses de fósforo no solo 3.....	28
Figura 4	Diferença de teor médio de P disponível recuperado pelos extratores em função das doses de fósforo no solo 4.....	29
Figura 5	Diferença de teor médio de P recuperado pela planta (g kg^{-1}) em função das doses de fósforo em cada solo testado.....	30
Figura 6	Valores de P-recuperado pelo extrator Chang & Jackson em função dos das doses de P aplicadas aos solos.....	32
Figura 7	Porcentagem das frações de P nos cambissolos solódicos (solos 1 e 2).....	35
Figura 8	Porcentagem das frações de P nos cambissolos sódicos (solos 3 e 4).....	36
Figura 9	Produtividade do sorgo em campo em Mg ha^{-1} de massa seca em função das doses crescentes de P	40
Figura 10	Modelo de regressão da massa seca do Sorgo em condições de vasos com diferentes solos.....	41
Figura 11	Diferença de altura de planta em função das doses de fósforo em cada solo testado	41
Figura 12	Diferença de número de folhas de planta em função das doses de fósforo em cada solo testado.....	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Sistema de classificação de solos afetados por sais (Staff, 1954)	14
Tabela 2	Níveis de fósforo e doses de MAP por Tratamento em condições de casa de vegetação (vasos)	21
Tabela 3	Níveis de fósforo e doses de MAP por tratamento em condições de campo....	23
Tabela 4	Características químicas e físicas das amostras dos solos estudados	24
Tabela 5	Sequencia e procedimento do fracionamento de P e formas de P alvo	25
Tabela 6	Equações de regressão ajustadas entre teores de fósforo na parte aérea, como variável dependente (y) das doses de fósforo aplicadas (x)	31
Tabela 7	Valores médios das frações de P nos solos estudados em condição de campo e em vasos, Análise de variância, teste de média e coeficiente de variação.....	33
Tabela 8	Coefficientes de correlação de Pearson entre os teores das frações de P inorgânico e características dos solos.....	38

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	REFERENCIAL TEÓRICO	14
3	MATERIAL E MÉTODOS	20
3.1	ÁREA EXPERIMENTAL.....	20
3.2	DELINEAMENTO EXPERIMENTAL EM CAMPO.....	20
3.3	DETERMINAÇÃO DOS TEORES DE P-DISPONÍVEL POR DIFERENTES EXTRATORES	21
3.4	DELINEAMENTO EXPERIMENTAL EM CAMPO.....	22
3.5	CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E FÍSICA DOS SOLOS UTILIZADOS NOS ENSAIOS.....	23
3.6	FRACIONAMENTO DO FÓSFORO INORGÂNICO.....	24
3.7	AVALIAÇÃO DO TEOR DE MASSA SECA, PRODUTIVIDADE E DO TEORES DE P NO SORGO.....	25
3.8	ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	26
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
4.1	CARACTERÍSTICAS DO SOLO.....	27
4.2	DISPONIBILIDADE DO P.....	27
4.3	FRACIONAMENTO QUÍMICO DO P.....	32
4.4	CORRELAÇÕES DAS FRAÇÕES DE P COM EXTRATORES, P NA PLANTA E COM AS CARACTERÍSTICAS DO SOLO.....	37
4.5	PRODUTIVIDADE E VARIÁVEIS BIOMÉTRICAS DO SORGO.....	39
5	CONCLUSÕES	44
	REFERÊNCIAS	45

1 INTRODUÇÃO

Na região do semiárido brasileiro são encontrados alguns locais que sofrem com a escassez de chuvas e calor intenso, gerando em alguns casos solos pouco produtivos. Na microrregião do Pajeú, no estado de Pernambuco, as temperaturas podem chegar a 37 ° no verão. Essas condições fazem com que haja necessidade de uso de irrigação, que associada ao uso de fertilizantes para melhoramento das condições de cultivo pode resultar em salinização do solo. Além disso, o relevo predominantemente plano permite acentuada erosão eólica no período seco, contribuindo ainda mais para o processo de salinização. Apenas no município de Serra Talhada, cerca de 3600 ha já são considerados salinizados (MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO AGRÁRIO, 2011).

Para se tentar diminuir o problema da salinidade podem-se utilizar técnicas de manejo do solo como: fitoextração, fitorremediação e lavagem do solo, mas que algumas vezes são alternativas caras e inviáveis. Nesse caso, para evitar que o solo seja inutilizado e as terras abandonadas, fato já muito observado em várias áreas do Nordeste brasileiro, plantas não-halófitas tolerantes podem ser cultivadas. O Sorgo, em especial, o sorgo sudão (*Sorghum sudanense* (Piper) Stapf), é um exemplo de uma planta não-halófita tolerante, que se destaca por sua tolerância ao estresse salino, bastante utilizado como alternativa para solos salinizados.

A fertilidade do solo é limitada nos solos salinos do semiárido, pois apesar de apresentarem quantidades adequadas de fósforo, este elemento associado a altas concentrações de cálcio em solos com elevados valores de pH (como observado em muitos solos salinos), pode-se tornar indisponível para os vegetais.

Cada técnica de extração deve ser adequada para um tipo de solo diferente, faz-se necessário o estudo de diferentes técnicas para estimar com precisão os teores de fósforo disponível para as culturas. O método de estimação de fósforo disponível (P-disponível) no estado de Pernambuco, assim como na maior parte do Brasil, é por meio do extrator Mehlich-1. Sua constituição ácida ($\text{HCl} + \text{H}_2\text{SO}_4$) favorecendo ao processo de solubilização de compostos estáveis como P-Ca em solos salinos e com pH elevado, superestimando os reais teores deste nutriente para as plantas (BONFIM et al., 2004). A consequência disso pode ser uma queda na produtividade dessa atividade tão importante para a região.

Estudos que utilizam o fracionamento de fósforo podem ser úteis para obter informações adicionais sobre o potencial de mobilidade e disponibilidade de P no solo. Além

disso, é importante para uma melhor compreensão da interação fósforo-solo e para gestão ambiental do elemento no sistema solo-planta (SHAHEEN et al., 2007).

Vários estudos foram realizados a respeito dessa dinâmica do P no solo, mas eles foram normalmente referidos a solos desenvolvidos em condições edafoclimáticas diferentes das existentes no ambiente do semiárido, assim, as conclusões obtidas a partir deles podem não ser aplicáveis a solos dessa região.

A partir do exposto, os objetivos do trabalho foram; definir qual o melhor extrator para o P-disponível; quantificar os teores de P disponível por diferentes extratores; avaliar as formas de P predominantes; avaliar a adaptabilidade do sorgo forrageiro cultivado; quantificar a produtividade de sorgo e recomendar as doses de P para o sorgo forrageiro em solos afetados por sais do semiárido.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A salinidade refere-se à existência de níveis de sais solúveis no solo que interferem negativamente no rendimento das culturas, podendo causar prejuízo econômico (BATISTA et al., 2001). Dentre os sais solúveis a predominância nesses tipos de solos é dos cloretos, sulfatos e bicarbonatos de Na^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} (QADIR et al., 2007; HOLANDA et al., 2010). Esse problema já atinge 20 % das terras cultivadas e metade das terras irrigadas do mundo (SAIRAM e TYAGI, 2004). Ocorre principalmente em regiões áridas e semiáridas, como no nordeste do Brasil onde aproximadamente 25 % das áreas irrigadas já foram salinizadas (GHEYI, 2000).

O potencial hidrogênionico (pH), a porcentagem de sódio trocável (PST), a condutividade elétrica do extrato de saturação (CEes) e relação de adsorção de sódio (RAS) são algumas das propriedades químicas utilizadas para classificar os solos afetados por sais. Os valores específicos para distinguir estes solos foram estabelecidos pelo United States Salinity Laboratory (USSL) (STAFF, 1954) de acordo com a tabela 1.

Tabela 1 - Sistema de classificação de solos afetados por sais

Solo	pH	PST	CEes	RAS
Salino	< 8,5	< 15 %	>4 dS m ⁻¹	< 13
Salino-sódico	< ou = 8,5	> ou = 15 %	> 4 dS m ⁻¹	> ou = 13
Sódico	Entre 8,5 e 10	> ou = 15 %	< 4dS m ⁻¹	>ou= 13

Fonte: Staff (1954)

PST- Porcentagem de sódio trocável; CEes- Condutividade elétrica do extrato da pasta de saturação do solo; RAS-Relação de adsorção de Na.

A ocorrência de solos salinos pode apresentar duas origens. Uma primária quando a mineralogia do solo é rica em sais e essas rochas sofrem intemperismo químico. Associado a isso, altas taxas de evaporação e a baixa precipitação pluviométrica, concentra solutos no solo, situação comum em regiões áridas e semiáridas, explicando a ocorrência de solos salinos, salinos-sódicos e sódicos. Em solos salinos de origem secundária (antropogênica), os sistemas de fertirrigação empregados localmente, em regiões que a água de irrigação é salina, ou em sistemas que utilizam elevadas concentrações de fertilizantes com alto índice salino (WILLADINO e CÂMARA, 2005).

O endurecimento em excesso, a presença de eflorescências salinas, formação de crostas e a ausência de vegetação ou presença de plantas halófitas são alguns dos indicativos da salinidade no solo (CONSELHO NACIONAL DE RESERVA DA BIOSFERA DA CAATINGA, 2004). Processos como a germinação de sementes, crescimento e vigor de plântulas, crescimento vegetativo, floração e frutificação são negativamente afetados pela alta concentração de sal, levando a diminuição da produtividade e qualidade dos produtos, causando prejuízo econômico (SAIRAM e TYAGI, 2004).

A presença de sais em excesso nos solos é um tema bastante estudado em várias partes do mundo, principalmente avaliando seus efeitos diretos, ou seja, toxicidade de íons presentes em concentrações elevadas, alteração do potencial osmótico e degradação de algumas propriedades físicas do solo (FREIRE, M. B. G. S. e FREIRE, F. J, 2007).

Para evitar que o solo seja inutilizado e as terras abandonadas, técnicas de manejo para correção do solo como a lavagem do solo, aplicação de corretivos químicos e a fitorremediação ou fitoextração tem sido utilizadas em diversas situações. A fitoextração utilizando plantas halófitas é uma alternativa para recuperação de solos salinos, tendo a vantagem do baixo custo e de ser não agressiva ao ambiente (LEAL et al., 2008)

Alternativa para a utilização desses solos é o cultivo de plantas não-halófitas tolerantes (tendo as mesmas vantagens da fitoextração), como o sorgo, especialmente o sorgo sudão (*Sorghum sudanense* (Piper) Stapf), que se destaca por sua tolerância ao estresse salino, sendo uma alternativa para o aproveitamento de recursos (água e solo) salinos (IGARTUA et al., 1995). Devido a sua resistência a fatores ambientais adversos, têm-se crescido a importância do sorgo na produção de forragens nos últimos anos no Brasil e no mundo (MIRANDA et al., 2010). Elevada produtividade, bom padrão de fermentação e alto valor nutritivo das silagens produzidas, são algumas características importantes da cultura para a produção animal. Proporciona ainda silagem a baixos custos de produção, com a possibilidade de uso da rebrota da planta, devido à capacidade de conservar ativo seu sistema radicular. Tomich et al. (2004) observaram altas taxas de rebrota, próximas ou superiores a 90%, para 12 híbridos de sorgo avaliados para corte.

Analisando o modelo produtivo do semiárido brasileiro, percebe-se um grande número de pequenas e médias propriedades rurais marcadas pela mão-de-obra familiar. Nesse cenário, o sorgo deve atender a múltiplos propósitos que vão desde a produção de grãos, onde o seu uso vai desde alimentação humana e animal, até como fonte de matéria prima para produção de álcool anidro, bebidas alcoólicas, colas e tintas; fibra, celulose, e mais

recentemente, também para produção de energia a partir de variedades doces ou sacarinas, que já vem sendo testadas em algumas regiões do país e do mundo. Suas panículas são utilizadas para produção de vassouras, o colmo para extração de açúcar, e sua forragem é utilizada na nutrição de ruminantes (BARBANTI et al., 2006; IPA, 2008).

Em áreas do semiárido brasileiro, onde encontramos grandes áreas com problemas de salinização, percebe-se que o fósforo (P) tem sido encontrado em teores adequados, que em níveis não muito altos de pH proporcionam teores elevados de P solúvel fazendo com que a carência deste elemento não seja problema para tais solos. Porém valores muito altos de pH e as altas concentrações de cálcio (Ca) assumem importância, pois o P liga-se ao Ca, precipitando e ficando na sua forma indisponível, causando deficiências deste elemento para as plantas (FREIRE, M. B. G. S. e FREIRE, F. J, 2007).

Nas plantas, o P constitui cerca de 2 % da matéria seca e possui importante função biológica. Componente estrutural de macromoléculas, como ácidos nucleicos, fosfolipídios e também ATP, fundamental para várias vias metabólicas e reações bioquímicas (TAIZ e ZEIGER, 2004). Através da utilização desta energia que a semente germina, efetua a fotossíntese, absorvem de forma ativa os nutrientes do solo e sintetiza vários compostos orgânicos, além de estimular o crescimento das plantas e sua frutificação (MIRANDA, 2007). O P ainda acelera a formação das raízes e é essencial para seu funcionamento; aumenta o perfilhamento das gramíneas, cereais ou forrageiras; regulador de maturação; maior teor de carboidratos, óleo, gordura e proteínas; essencial para a fixação biológica de nitrogênio entre outras. Já a sua deficiência causa nas plantas; menor vegetação, produção e qualidade, leva a senescência precoce, e reduz ainda a taxa de crescimento e o estabelecimento das plantas forrageiras limitando seu potencial produtivo (NOVAIS et al., 2007; CECATO et al., 2004).

O P move-se no solo por difusão, e esta é influenciada por diversos fatores, como: precipitação por cátions de ferro, alumínio e cálcio; teor de água no solo; adsorção pelos colóides do solo; compactação do solo; distância a percorrer até atingir as raízes e o teor do elemento no solo (COSTA et al., 2006). Geralmente, são baixos os transportes de P devido a sua interação com os colóides do solo, principalmente em solos intemperizados (VILLANI et al., 1993; Costa et al., 2006). No caso do semiárido nordestino é mais comum a ocorrência de solos menos ácidos que em outras regiões do país, favorecendo a formação de compostos pouco solúveis de fosfato de Ca, o que diminui a eficiência do extrator Mehlich-1 (SILVA et al., 2004).

A disponibilidade de P, ou a sua presença na forma lábil, normalmente está ligada a quantidade de P distribuída entre a fase sólida e a solução do solo, o qual as quantidades se correlacionam com o conteúdo de P absorvido pelas plantas. Pode ser influenciado pela umidade, teor de argila e poder tampão do solo (NOVAIS et al., 2007; SCHLINFWEIN e GIANELLO, 2009). É avaliada em duas etapas, a primeira é a extração da fração de P do solo e a segunda é a dosagem do P no extrato.

Para que um extrator seja recomendado, é necessário que os teores de P que extrai do solo correlacionem-se com a absorção desse nutriente pelas plantas (ALVAREZ et al., 2000). No estado de Pernambuco, o extrator mais utilizado é o Mehlich-1, porém o mesmo é formado por dois ácidos diluídos (clorídrico e sulfúrico), diminuindo o pH do solo e solubilizando a fração de P ligada a Ca (P-Ca) e compartimentos mais estáveis do P no solo. Assim, as análises de fertilidade podem estar superestimando o P disponível do solo e consequentemente as recomendações de adubação fosfatada em Pernambuco, podem estar subestimando as doses recomendadas em solos com maior proporção de P-Ca (BONFIM et al., 2004), como é o caso dos solos afetados por sais.

Para um melhor entendimento da disponibilidade de P e suas transformações no solo, vários métodos de fracionamento tem sido desenvolvidos (ROTTA, 2012). O fracionamento é um método que tem sido utilizado para quantificar esses reservatórios, determinando as várias frações de P no solo de acordo com o seu grau decrescente de disponibilidade para as plantas, usando, sequencialmente, extratores de menor à maior força de extração, os quais removem P inorgânico (Pi) das formas mais disponíveis às mais estáveis. Uma das vantagens do fracionamento é permitir relacionar as formas de P no solo à sua disponibilidade para as plantas (GATIBONI et al., 2007).

Estudos que utilizam o fracionamento químico do P têm mostrado que as frações orgânicas e inorgânicas de P no solo podem atuar como fonte ou dreno para a solução do solo, dependendo das suas características mineralógicas, das condições ambientais e da fertilização e do manejo do solo. Quando possui reservas naturais de P ou mesmo pela adição de fertilizantes, o solo serve como fonte de P para as plantas, já quando está em um grau avançado de intemperismo ou possui baixas reservas naturais, atua como dreno (NOVAIS e SMITH, 1999).

Em pesquisas realizadas com fracionamento de P encontraram que em sistemas com carência de P a absorção pelas culturas leva a um desencadeamento de efeito cascata da reposição do P lábil, inicialmente pelas formas de labilidade intermediária e, posteriormente,

pelas formas de baixa labilidade. Indicando que todas as formas de P podem ser disponibilizadas às plantas, porém, quanto maior a interação do P com os colóides do solo, menor é a velocidade de reposição das formas lábeis. Nesse sentido, os autores concluíram que a dinâmica das formas de P mostra que provavelmente a taxa de liberação deste elemento pelas formas menos lábeis não seja suficiente para manter o crescimento de cultivos comerciais, mas é, provavelmente, o mecanismo que sustenta o crescimento das plantas em ecossistemas naturais (GATIBONI et al., 2007).

Pesquisas feitas com Cambissolos da Ilha de Fernando de Noronha encontraram dentre as frações inorgânicas teores mais elevados de P-Fe, seguidos por P-Ca, P-H₂O e P-Al. Os teores P-Fe, predominante sobre as demais frações, refletem a influência do material de origem dos solos da ilha. Os autores avaliando diferentes extratores encontraram também correlação significativa do P-Ca com o fósforo disponível por Mehlich-1 (ROCHA et al., 2009), evidenciando a possível superestimação do fósforo disponível pela solubilização da fração P-Ca (NOVAIS e SMITH, 1999), justificando os altos valores de fósforo disponível obtidos com este extrator.

No semiárido foi realizado um trabalho com extrações sucessivas com resina em latossolos e luvisolos, onde foi observado que a fração extraída por NaOH (P ligado a Fe e Al) foi a que mais decresceu, podendo ter tido uma participação importante no reenchimento da fração mais lábil, parecendo ser a fração hidróxido a principal tamponante das frações mais lábeis (ARAÚJO et al., 2004). No mesmo trabalho os autores perceberam que a fração que teve segundo maior decréscimo foi a extraída por H₂SO₄ (P-Ca) nos dois tipos de solos estudados. Eles concluíram então que em áreas secas, onde os solos são menos intemperizados, essa fração também pode contribuir para o tamponamento de formas mais lábeis de P no solo. Portanto, as frações de P extraídas por NaOH e H₂SO₄, que representam formas mais estáveis no solo, parecem ter também um papel preponderante no processo de manutenção do P disponível nos solos do semiárido (ARAÚJO et al., 2004).

Nos solos mais intemperizados e nos menos intemperizados com baixos valores de pH e de Ca²⁺, a maior parte do Pi encontrada foram nas formas de P-Al e P-Fe. Já nos solos de pH alcalino e altos teores de Ca²⁺, o Pi foi encontrado principalmente na forma de P-Ca, representando 55 % do P total, pois tanto o P nativo como o P adicionado por fertilizantes precipitam com o Ca²⁺ da solução do solo, formando fosfatos de Ca pouco solúveis (SOUZA JÚNIOR et al., 2012).

Araújo e Salcedo (1997) em pesquisa com solos podzólicos encontraram um indicativo que as propriedades dos solos, e não a intensidade dos acréscimos de P são determinantes na distribuição do P entre as frações.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 ÁREA EXPERIMENTAL

O experimento foi realizado em duas etapas, sendo uma em vasos e outra em campo. Ambos foram implantados na Unidade Acadêmica de Serra Talhada (UAST) da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), localizada no município de Serra Talhada, PE.

O clima da região segundo classificação de Köppen é do tipo BShw (BSh = clima seco de estepes de baixas latitudes; w = com chuvas de verão retardadas para o outono). A temperatura média anual é de 25,9 °C e a precipitação média anual é de 642 mm e concentrando-se principalmente entre os meses de dezembro a maio, correspondendo a 85 % da média anual (MOURA et al., 2006).

3.2 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL EM VASOS

O ensaio foi montado em blocos completos casualizados em esquema fatorial 4 x 5, com quatro solos e cinco doses de fósforo (0, 30, 60, 90 e 120 kg ha⁻¹ de P₂O₅), com quatro repetições totalizando 80 vasos e a cultura utilizada foi o sorgo sudão.

O solo 1 (7,9521° de latitude sul e 38,2949 de longitude oeste) e 2 (7.9543° de latitude sul e 38.2986° de longitude oeste) foram coletados no campus da UAST, sendo em 2 condições diferentes de relevo. Onde o solo 1 foi coletado em terreno plano e o 2 em posição de encosta, coberto com vegetação espontânea e sem uso agrícola a pelo menos 5 anos. Além desses, mais dois solos foram coletados no Perímetro Irrigado Cachoeira II. O solo 3 (7.9842° de latitude sul e 38.3210° de longitude oeste) e o solo 4 (7.9838° de latitude sul e 38.3215° de longitude oeste), em duas condições diferentes de salinidade, à jusante do Açude Cachoeira II e às margens do Riacho Cachoeira e do Rio Pajeú. O solo 3 foi anteriormente classificado como Cambissolo Flúvico (ALVES, 2012), os demais solos ainda estão em processo de identificação dos demais níveis categóricos, porém são todos Cambissolos alcalinos (pH superior a 7), salinos, sódicos, salino-sódicos ou com propensão a salinidade. A coleta foi realizada na camada de 0-20 cm de profundidade.

Antes do plantio foi feita a adubação fosfatada, sendo a fonte utilizada o fosfato monoamônio (MAP), aplicada na cova 5 dias antes do plantio, tempo necessário para a solubilização do adubo. A necessidade de adubação com nitrogênio e potássio foi verificada

em análise e seguiu o estabelecido pela Comissão Estadual de Fertilidade do Solo (2008). O nitrogênio presente no MAP foi compensado aplicando-se ureia, de modo que todos os tratamentos receberam $91,7 \text{ kg ha}^{-1}$ de N. A adubação com MAP e ureia foi realizada antes da semeadura e as doses de nitrogênio e ureia foram aplicadas ao mesmo tempo, aproximadamente uma semana antes do plantio, tempo necessário observado para a solubilização das fontes (Tabela 2). A coleta foi realizada na fase de emborrachamento, que ocorreu aos 50 dias após o plantio.

Tabela 2 - Níveis de fósforo e doses de MAP por Tratamento em condição de casa de vegetação (vasos)

Doses kg ha^{-1}	MAP ----- g vaso^{-1} -----	Ureia	Total de N
0	-	0,27	0,45
30	0,31	0,21	0,45
60	0,61	0,14	0,45
90	0,92	0,07	0,45
120	1,23	-	0,45

Fonte: Marques, R. P. (2013)

O experimento foi conduzido em vasos plásticos (25 cm de diâmetro e 20 cm de altura) contendo sete litros do solo. As sementes foram cedidas pelo Instituto Agrônomo de Pernambuco (IPA) e semeadas 4 sementes por vaso, com desbaste realizado após 10 dias deixando apenas uma planta por vaso. Durante os primeiros dias, até a germinação e estabelecimento da cultura, a irrigação foi diária. Após o estabelecimento da cultura a irrigação foi realizada com intervalo de um dia. A dose de água foi calculada pelo método de Penman-Monteith, parametrizado no boletim 56 da FAO, sendo ajustadas para área do vaso (ALLEN et al., 1998).

3.3 DETERMINAÇÃO DOS TEORES DE P-DISPONÍVEL POR DIFERENTES EXTRATORES

No momento do corte do sorgo foi coletado nos vasos amostras homogêneas de solo, ambas para as determinações de P. Na tentativa de encontrar o extrator mais indicado para os

solos testados foram testados seis extratores com características distintas, conforme métodos descritos por Shaheen et al. (2007), e descritos a seguir:

- Mehlich-1 - fortemente ácido (0,05 M HCl+ 0,0125 M H₂SO₄; razão solo-solução de 1:10 e agitação de 5 minutos);
- “Pox” - também ácido, porém com pH um pouco mais elevado que o Mehlich-1 (0,175 M oxalato de amônio + 0,1 M ácido oxálico; razão solo-solução de 0,5:30 e agitação de 2 horas.);
- Soltanpour - neutro (1 M NH₄HCO₃+ 0,005 M DTPA; razão solo-solução de 1:2 e agitação de 15 minutos);
- Olsen - moderadamente alcalino (0,5 M NaHCO₃; razão solo-solução de 1:20; agitação de 30 minutos);
- Chang & Jackson - fortemente alcalino (0,1 M NaOH + 1 M NaCl; razão solo-solução de 1:50 e agitação de 17 horas.);
- Saunder - também fortemente alcalino (0,1 M NaOH razão solo-solução de 1:50 e agitação de 17 horas).

O teor de P no solo foi dosado no extrato por colorimetria de acordo com Embrapa (2009).

3.4 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL EM CAMPO

O ensaio foi montado em blocos casualizados com quatro repetições, sendo os tratamentos compostos por cinco doses de fósforo na fundação da área, sendo essas de 0, 30, 60, 90 e 120 kg ha⁻¹ de P₂O₅ (Tabela 2), contemplando desde a faixa recomendada até o dobro da dose máxima recomendada para a cultura do Sorgo forrageiro no manual de recomendação de adubação para o Estado de Pernambuco (COMISSÃO ESTADUAL DE FERTILIDADE DO SOLO, 2008).

O plantio foi manual em espaçamento de 0,2 x 0,8 m e o controle de plantas daninhas foi realizado por meio de capinas manual. A colheita foi realizada na fase de emborrachamento, que ocorreu aos 55 dias após o plantio. Cada parcela foi composta por quatro linhas de 4 m, sendo as 2 linhas centrais descontadas de 1,0 m nas extremidades, ficando a área útil da parcela, com 20 plantas.

O MAP foi aplicada no sulco de plantio 5 dias antes do plantio, tempo necessário para a solubilização do adubo. A necessidade de adubação com nitrogênio e potássio foi verificada em análise e seguiu o estabelecido pela Comissão Estadual de Fertilidade do Solo (2008). O Nitrogênio adicionado pelas doses de MAP foi equiparado a partir da adição de Ureia (Tabela 3).

Tabela 3 - Níveis de fósforo e doses de MAP por tratamento em condições de campo

Nível	MAP	MAP	MAP
Kg ha ⁻¹ P ₂ O ₅	Kg ha ⁻¹	g parcela ⁻¹	g suco ⁻¹
0	0	0	0
30	60	57,6	14,4
60	120	115,2	28,8
90	180	172,8	43,2
120	240	230,4	57,6

Fonte: Marques, R. P (2013)

A irrigação foi definida como “irrigação de salvação”, sendo as lâminas aplicadas de 2 a 3 vezes por semana para repor a água perdida por evapotranspiração, calculada pelo método de Penman-Monteith, parametrizado no boletim 56 da FAO (ALLEN et al., 1998).

3.5 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E FÍSICA DOS SOLOS UTILIZADOS NOS ENSAIOS

A partir da definição da área experimental e das áreas de coleta do solo, foram coletadas amostra compostas para a caracterização química e física do solo da área experimental e dos solos utilizados nos vasos (Tabela 4).

Quimicamente foram realizadas as determinações de pH do solo em água e em CaCl, teores de Na, K, Ca e Mg trocáveis e acidez potencial (H+Al), além do P remanescente conforme métodos da Embrapa (2009). Fisicamente foram realizadas as seguintes determinações: composição granulométrica, argila dispersa em água (ADA), densidade do solo e das partículas, conforme métodos descritos em Embrapa (1997).

Tabela 4 - Características químicas e físicas das amostras dos solos estudadas

Características	Solo 1	Solo 2	Solo 3	Solo 4
pH (água)	7,3	7,4	7,4	7,9
pH (CaCl)	6,6	7,0	7,5	7,8
Ca ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	4,35	3,25	9,65	4,95
Mg ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	1,25	1,35	6,10	2,15
Na ⁺ (cmol _c dm ⁻³)	1,30	0,83	21,30	89,48
K ⁺ (cmol _c dm ⁻³)	1,92	1,54	6,77	23,15
H+Al (cmol _c dm ³)	2,85	2,85	2	1,75
T (cmol _c dm ³) ⁽¹⁾	11,68	9,81	45,82	121,48
P (mg dm ⁻³) ⁽²⁾	65,9	5,56	1,95	5,56
Prem (mg dm ⁻³)	42,4	36,4	31,5	37,6
V% ⁽³⁾	75,59	70,96	95,63	98,55
PST ⁽⁴⁾	11,16	8,41	46,49	73,65
Areia (g kg ⁻¹)	835	723	314	587
Silte (g kg ⁻¹)	100	180	500	280
Argila (g kg ⁻¹)	80	100	180	120

Fonte: Marques, R. P. (2013)

¹Capacidade de troca de cátions potencial; ²Fósforo remanescente; ³Saturação por bases; ⁴ Percentagem de sódio trocável

3.6 FRACIONAMENTO DO FÓSFORO INORGÂNICO

As amostras de solo coletadas nos vasos para determinação do P-disponível foram utilizadas também para análise do fracionamento do P. Em campo, as amostras de solo para realização do fracionamento foram coletadas em cada parcela na profundidade de 0-20 cm. O fracionamento químico do fósforo foi realizado nas doses zero (controle) e 60 kg ha⁻¹ de P₂O₅, por ser a dose de P recomendada para esses solos. A análise foi realizada conforme método proposto por Olsen e Sommers (1982) (Tabela 5).

O método foi ligeiramente modificado a partir da versão original com a adição de um passo inicial de extração com bicarbonato de sódio (Extrator Olsen) para o P disponível a planta (HARRELL e WANG, 2006). A fração de P residual também não foi feita pelo mesmo método do fracionamento, sendo feita a extração do P total conforme metodologia descrita por O'Halloran (1993) e o P residual foi calculado por diferença.

Tabela 5 - Sequencia e procedimento do fracionamento de P e formas de P alvo

Fração	Extratores	Tempo	Lavagem	Diferentes formas de P
NaHCO ₃ -P	0.5 M NaHCO ₃	30min	nenhuma	P lábil incluindo P solúvel, considerado como disponível para o vegetal (Olsen et. al, 1954; Bowman e Cole, 1978)
NaOH-P	0.1 M NaOH+1 M NaCl	17h	1 M NaCl	P ligada principalmente à Óxidos de Fe e Al (Chang e Jackson, 1957; Delgado e Torrent, 2000; Harrell e Wang, 2006)
CB-P	0.3 M citrato de sódio +1 M NaHCO ₃	15 min a 85 °C	nenhuma	Fosfato re-adsorvido para superfícies de carbonatos durante a extração de NaOH anterior; também lábil, pedogenético, fosfatos de Ca (Williams et al, 1971;. Delgado e Torrent, 2000; Harrell e Wang, 2006)
CBD-P	0,3 M citrato de sódio +1 M NaHCO ₃ +1 g de ditionito de sódio	aquecer por 15 min a 85 ° C após a adição CB; adicional 15 min após a adição de ditionito	saturado com NaCl	Redutor solúvel em P, principalmente presos dentro de Óxidos de ferro e óxidos hidratados (Chang e Jackson, 1957;. Williams et. al, 1971)
HCl-P	1 N HCl	1 h	nenhuma	P-Ca estável incluindo apatita litogênica, excluindo P-Ca mais lábeis , formas removidas na CB anterior e frações CBD (Chang e Jackson, 1957; Delgado e Torrent, 2000; Harrell e Wang, 2006)

Fonte: Shaheen et al. (2007)

3.7 AVALIAÇÃO DO TEOR DE MASSA SECA, PRODUTIVIDADE E DOS TEORES DE P NO SORGO

Antes do corte foi avaliada a altura de plantas e número de folhas. Após o corte o material foi triturado em moinho tipo Wiley e o teor de P na matéria seca da parte aérea das plantas foi determinado após digestão nitroperclórica (BATAGLIA et al., 1983) e dosado no extrato por colorimetria (EMBRAPA, 2009).

Na ocasião do corte foi aferida a massa fresca da parte aérea do sorgo, em seguida o material foi levado para estufa com circulação de ar a 65-70 °C, até atingir peso constante, sendo, em seguida, aferida a massa seca.

Nos vasos foi calculado o teor de massa seca (g kg⁻¹). Já em campo foi calculada a produtividade de massa fresca e massa seca em Mg por hectare (Mg ha⁻¹).

3.8 ANÁLISE ESTATÍSTICA

As variáveis estudadas foram submetidas à análise de variância e de regressão, na busca de equações do teor de P nas plantas, da produção de matéria seca ou P recuperado pelos extratores estudados de acordo com o P aplicado. Foram realizadas ainda correlações lineares de Pearson entres os teores de P extraídos pela planta, os teores recuperados pelos extratores estudados, e as diferentes frações de P obtidas e com as características químicas e físicas do solo determinadas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

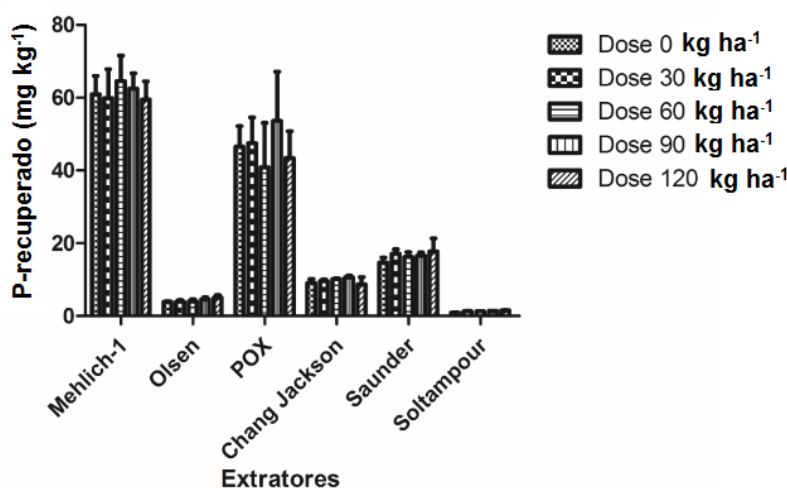
4.1 CARACTERÍSTICAS DO SOLO

Através das análises de caracterização do solo (Tabela 4), pode-se observar que os quatro Cambissolos utilizados são eutróficos ($V\% > 50\%$). Nota-se ainda que dois solos são solódicos (solos 1 e 2), e os demais sódicos (solos 3 e 4) (EMBRAPA, 2006). A composição granulométrica mostra que os solos 1, 2 e 4 possuem predominância de areia, seguido do silte e argila, sendo o solo 1 o mais arenoso. O solo 3 tem predominância de silte, mas, entre os solos estudados, é o que aparece com maiores teores de argila.

4.2 DISPONIBILIDADE DO P

Na avaliação da disponibilidade do P ocorreram diferenças estatísticas entre os extratores testados, porém não ocorreram diferenças estatísticas entre as doses de P aplicadas. No solo 1 os teores de P extraídos variaram de 61,49 a 1,31 mg kg^{-1} , sendo o maior teor recuperado pelo Mehlich-1 e o menor pelo Soltampour (Figura 1).

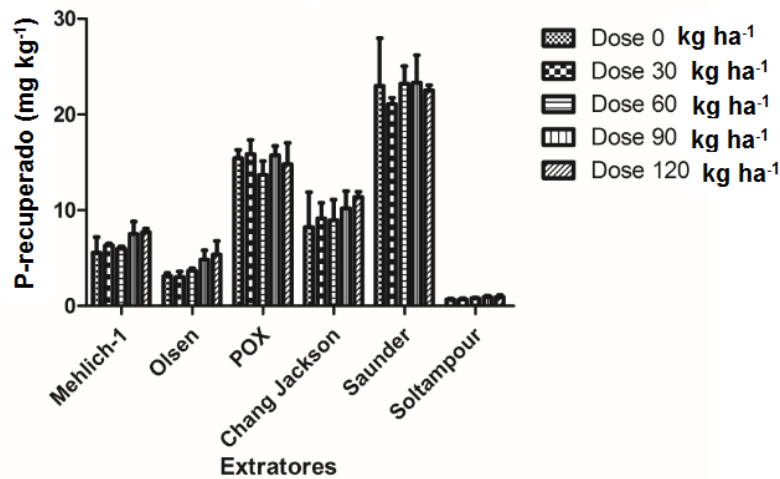
Figura 1 - Diferença de teor médio de P disponível recuperado pelos extratores em função das doses de fósforo no solo 1



Fonte: Marques, R. P. (2013)

No solo 2 não houve diferença entre os extratores utilizados e as doses de P, mas sim entre o teor de P recuperado pelos extratores. A variabilidade foi entre 22,63 a 0,81 mg kg⁻¹, com maior teor conseguido por Saunder e menor por Soltampour (Figura 2).

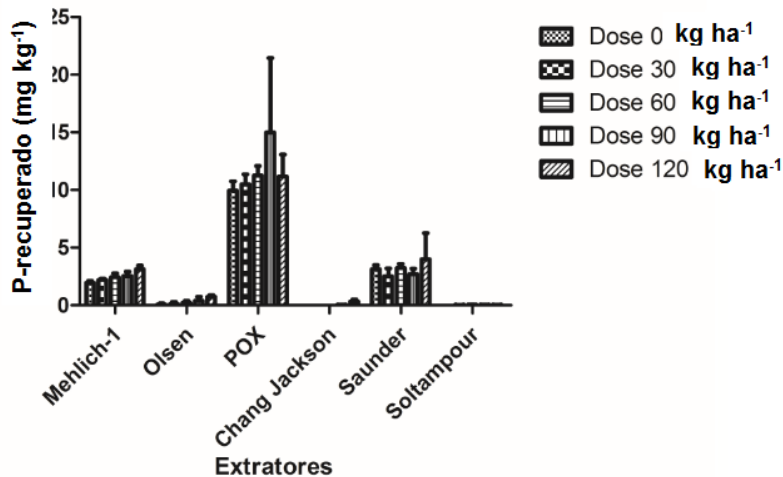
Figura 2 - Diferença de teor médio de P disponível recuperado pelos extratores em função das doses de fósforo no solo 2



Fonte: Marques, R. P. (2013)

No solo 3 a variabilidade foi de 11,58 a 0,04 mg kg⁻¹ de P recuperado, onde o maior teor foi extraído por Pox e o menor por Chang e Jackson (Figura 3).

Figura 3 - Diferença de teor médio de P disponível recuperado pelos extratores em função das doses de fósforo no solo 3

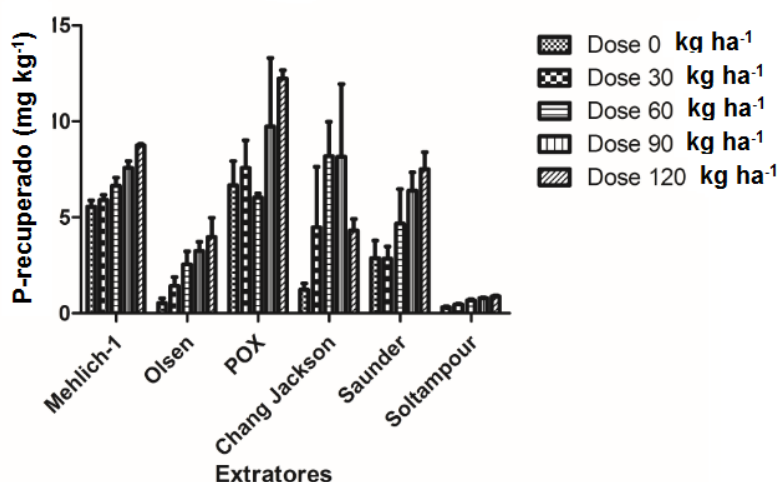


Fonte: Marques, R. P. (2013)

Para o solo 4 a variabilidade foi de 8,45 mg kg⁻¹ extraído por Pox a 0,63 mg kg⁻¹ por Soltampour (Figura 4).

Excetuando o extrator Saunder, para todos os extratores o solo 1 é o que apresenta maior teor de P. Nota-se ainda que o Mehlich-1 mostra um teor de P disponível bem mais elevado que os demais extratores. De modo geral os extratores ácidos (Mehlich-1 e Pox) foram os que recuperaram os maiores teores de P, exceto no solo 2, reforçando a tese de Bonfim et al. (2004) de que a utilização de extratores ácido, no caso o Mehlich-1, podem estar subestimando as doses recomendadas para a adubação fosfatada no semiárido de Pernambuco. E os menores teores foram recuperados pelo extrator neutro em todos os solos testados. Pode-se notar ainda que à medida que os solos vão ficando mais sódicos, o teor de P recuperado pelos extratores vai diminuindo.

Figura 4 - Diferença de teor médio de P disponível recuperado pelos extratores em função das doses de fósforo no solo 4



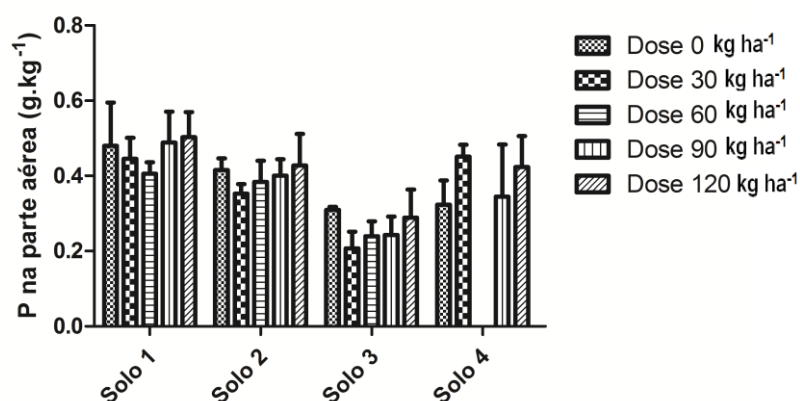
Fonte: Marques, R. P. (2013)

Bonfim et al. (2004) avaliando extratores, encontraram Mehlich-1 apresentando a melhor correlação com o P absorvido pelas plantas, porém esses resultados foram encontrados em solos ácidos, onde mesmo após correção os pHs foram menores que 6,5. Já em pesquisa realizada com Cambissolos com pHs variando entre 5,5 e 8,2, os extratores Mehlich-3 e Olsen foram os mais indicados para estimar o P disponível nesses solos (ROCHA et al., 2005).

Em solos calcários agrícolas a aplicação de fertilizantes fosfatados tem apresentado alguns problemas, principalmente, devido à fixação de P, baixa recuperação e acumulação no solo (HALAJNIA et al., 2009).

O teor de P recuperado pela planta só apresentou diferenças significativas entre os solos avaliados, mas não entre doses de P aplicadas (Figura 5). Entre os solos os teores variaram de 0,16 a 0,44 g kg⁻¹, com maior teor recuperado para o solo 1 e menor para o solo 3. No solo 4 a dose de 60 kg ha⁻¹ apresentou problemas de germinação, por isso os teores de P na parte aérea da planta foram zero. Da mesma forma que ocorreu com os extratores, à medida que o solo foi ficando mais sódico, o teor de P recuperado pela planta foi diminuindo.

Figura 5 - Diferença de teor médio de P recuperado pela planta (g kg⁻¹) em função das doses de fósforo em cada solo testado



Fonte: Marques, R. P. (2013)

Os extratores também foram submetidos a testes de regressões do teor de P recuperado em função das doses de P aplicadas (Tabela 6).

Na maioria dos casos, não foram obtidos modelos consideráveis para a determinação do nível críticos de P no solo por cada extrator, seja pelo ajuste fraco, visto a grande variabilidade, ou pela obtenção de modelos lineares que não permite a obtenção de um ponto de máximo no intervalo de doses testadas. Possivelmente os valores iniciais de P nos solos contribuíram para esses resultados.

Nesse contexto, para o solo 1 o melhor ajuste foi encontrado por Soltampour, no solo 2 Olsen foi que apresentou melhor resultado, no solo 3 foram encontrados bons ajustes tanto para Chang e Jackson como para Soltampour, e para o solo 4, os melhores ajustes foram encontrados por Mehlich-1 e por Soltampour.

Holford (1983) estudando diferentes extratores em solos com pHs diferentes concluiu que o extrator Mehlich-1, que é um extrator ácido, é mais indicado para solos ácidos, apresentando boa correlação nesse tipo de solo. Tal capacidade de correlação cai, no entanto, em solos com pH acima de 5,6. Neste trabalho, os solos estudados são alcalinos, com valores de pH variando entre 7,3 e 7,9, isso explica porquê o extrator Mehlich-1 apresentou coeficientes de correlação tão baixos, exceto no solo 4. O extrator Pox também apresentou um baixo desempenho nos solos testados, podendo ser pelo fato de também ser um extrator ácido, assim como o Mehlich-1.

Tabela 6 - Equações de regressão ajustadas entre teores de fósforo recuperado pelos extratores, como variável dependente (y) das doses de fósforo aplicadas (x).

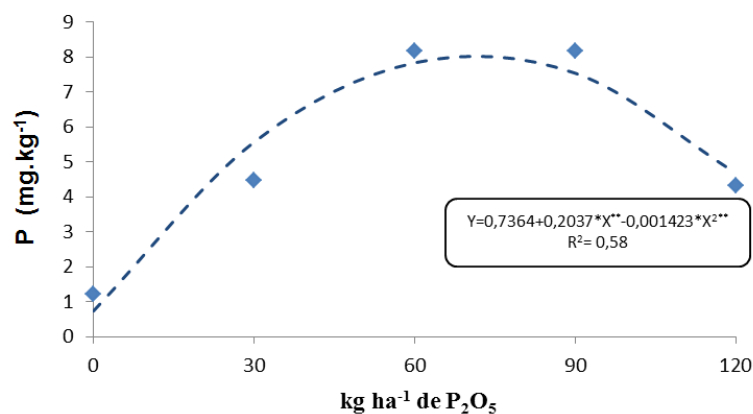
Extratores	Solos	Equação	R ²
Mehlich-1	3	$\text{Log}(Y)=0,2899+0,0015*X$	0,68**
	4	$\text{Log}(Y)=0,7311+0,0016*X$	0,92**
Olsen	2	$Y=2,73610+0,0210*X$	0,56**
	3	$Y=0,09329-0,0012*X + 0,00005*X^2$	0,64*
	4	$Y=0,6122+0,0289*X$	0,83**
Chang e Jackson	3	$Y=0,0270-0,0040*X + 0,00005*X^2$	0,72**
	4	$Y=0,7364+0,2037*X-0,1423*X^2$	0,58**
Pox	4	$Y=7,0113-0,0367*X+0,0006*X^2$	0,59**
Saunders	4	$\sqrt{Y}=1,5577+0,0098*X$	0,74**
Soltampour	1	$\sqrt{Y}=1,0206+0,0019*X$	0,69**
	3	$\sqrt{Y}=0,0746+0,0033*X - 0,00001*X^2$	0,71**
	4	$\sqrt{Y}=0,5844+0,0032*X$	0,92**

Fonte: Marques, R. P. (2013)

** Significativo a 1% de probabilidade. * Significativo a 5% de probabilidade. ° Significativo a 10% de probabilidade. ^{ns} Não significativo.

A pesar do extrator Chang e Jackson não ter apresentado os melhores ajustes (tabela 6), foi o único extrator em que conseguiu encontrar o ponto de máximo de P disponível, que por sua vez deveria levar a maior produtividade (Figura 6). No entanto o ponto de máxima produtividade não foi encontrado, pois não ocorreu diferença com aumento das doses de P.

Figura 6 - Valores de P-recuperado pelo extrator Chang e Jackson em função dos das doses de P aplicadas aos solos



Fonte: Marques, R. P. (2013)

Para tentar melhor entender as formas de fósforo disponível e como os extratores agiram nesses solos foi realizado o fracionamento do P.

4.3 FRACIONAMENTO QUÍMICO DO P

De acordo com ANOVA e teste de Tukey (Tabela 7), os resultados do fracionamento de P mostraram que as concentrações médias das frações de P, exceto o P solúvel (NaHCO₃-P), diferiram significativamente entre os solos estudados, comportamento que também foi observado por Shaheen et al., 2007 trabalhando com Entisols e Aridisols do Egito. Também não foram observadas diferenças estatísticas das frações de P entre as doses testadas (0 e 60 kg⁻¹ ha P₂O₅), ou seja, entre os teores naturais e a dose recomendada em Pernambuco para o Sorgo Sudão Forrageiro.

A fração extraída por NaHCO₃ (P-solúvel) não foi detectada em nenhum dos solos avaliados. Shaheen et al. (2007) também encontraram baixos teores dessa fração em Entisols e Aridisols do Egito, correspondendo a 1,6 a 4,3% do total de P desses solos. Em solos calcários de regiões subtropicais, pesquisas mostraram que ocorreu uma relação positiva significativa entre NaHCO₃-Pi e o teor de C orgânico nos solos (MALIK et al., 2012). No nosso estudo essa a fração NaHCO₃-P não foi encontrada, podendo ser pelo fato de nesses solos se encontrar baixo teor matéria orgânico. Por outro lado, outros autores sugerem que a absorção do P pela planta poderia explicar as baixas concentrações ou ausência do P solúvel no solo (CASSAGNE et al., 2000). Outro estudo de fracionamento do P realizado em solos calcários,

concluiu que as reações do P adicionado a esses solos foram bastante rápidas e o fosfato solúvel em água, foi convertido em curto espaço de tempo a compostos menos solúveis, devido à elevada capacidade de sorção desses solos (JALALI e RANJBAR, 2010).

Tabela 7 - Valores médios das frações de P nos solos estudados em condição de campo e em vasos, análise de variância, teste de média e coeficiente de variação

Solos	NaOH-P	CB-P	CBD-P	HCl-P	Res.-P	P total
			mg kg ⁻¹			
Campo	3,22 B	1,76 AB	7,1 AB	113,2 A	93,66 A	218,9 A
Solo 1	2,15 BC	2,57 A	6,7 B	134,5 A	101,7 A	247,7 A
Solo 2	7,03 A	2,2 A	8,04 AB	1,87 B	88,09 A	107,2 B
Solo 3	0,0 D	0,57 C	7,7 AB	4,79 B	16,4 B	27,7 C
Solo 4	0,31 CD	0,9 BC	9,2 A	1,19 B	2,8 B	12,08 C
	F	F	F	F	F	F
Solos	35,05**	13,51**	3,37**	74,15**	32,46**	112,05**
C.V.(%)	53,3	40,7	19,04	42,95	38,5	23,4

Fonte: Marques, R. P. (2013)

Médias seguidas de mesma letra maiúsculas na coluna, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey (P<0,05).

Observou-se a grande variabilidade nos teores das formas de P e do P total encontrados nos solos, sendo a média do teor de P total dos solos solódicos (campo, 1 e 2) de 191,2 mg kg⁻¹ e dos solos sódicos (solos 3 e 4) de 19,89 mg kg⁻¹.

No solo 1, tanto em condições de campo quanto em vasos, a fração HCl-P (P-Ca não-lábil) foi predominante, nos solos 2 e 3 foi o P residual que predominou e no solo 4 a fração que aparece maior teor é CBD-P (P-Fe e P-Al não-lábil).

A fração HCl-P (P-Ca não lábil) teve o seu teor variando de 1,19 a 134,5 mg kg⁻¹ entre os solos. Percebe-se que o solo 1 apresenta teores bem mais elevados dessa fração que os demais solos. Jalali e Ranjbar (2010) trabalhando com solos calcários, encontraram que a maior parte do P aplicado e nativo foi extraído utilizando HCl, o que indica que o P foi limitado, principalmente, por compostos de Cálcio. Já as formas mais solúveis do solo foram transformadas em frações mais estáveis (P- HCl e P-NaOH) com o tempo.

O P residual aparece com teores variando de 2,82 a 101,7 mg kg⁻¹ nos solos. Esse teor foi bem maior nos solos do campo, 1 e 2, onde não apresentaram diferenças estatísticas

significativas entre eles. Nos solos sódicos, o teor dessa fração foi bem menor, e entre eles, também não foram encontradas diferenças estatísticas.

A fração CBD-P teve o teor variando de 6,76 a 9,23 mg kg⁻¹ entre os solos. Quase todos os solos aparecem com teores estatisticamente iguais dessa fração, a pesar disso, se observado na figura 7 e 8, nota-se que nos solos sódicos (3 e 4) essa fração contribui com uma porcentagem bem maior para o P total do que nos solos solódicos (campo, 1 e 2), porém pelo fato do P total nos solos solódicos serem bem mais elevados que nos sódicos, essa fração acabou aparecendo com teores semelhantes em quase todos os solos.

O P extraído por NaOH-P (P-Fe e P-Al, consideradas lábeis) aparece com teores variando de 0 a 7,03 mg kg⁻¹ nos solos estudados, sendo o maior teor encontrado no solo 2 (Tabela 7).

Os teores da fração CB-P (P-Ca lábil) variam de 0,57 a 2,57 mg kg⁻¹ nos solos estudados. Com os maiores teores sendo encontrados nos solos solódicos, e os menores nos sódicos. Apesar dos solos sódicos apresentarem teores mais elevados de Ca²⁺ na caracterização, de modo relativo, os solos solódicos tem mais Ca que os sódicos, visto que tem menor PST, justificando maiores teores dessa fração nos solos solódicos.

Das frações estudadas, o teor de P disponível para as plantas pode ser considerado como a soma de NaHCO₃-P, NaOH-P e CB-P. Sendo assim, temos 4,98; 4,65; 9,23; 0,57 e 1,21 mg kg⁻¹ de P disponível para o campo, solo 1, 2, 3 e 4, respectivamente. Onde temos os maiores teores de P disponível no solo 2, seguido pelos solos 1, 4 e 3, comportamento esse semelhante aos extratores Olsen e Soltampour.

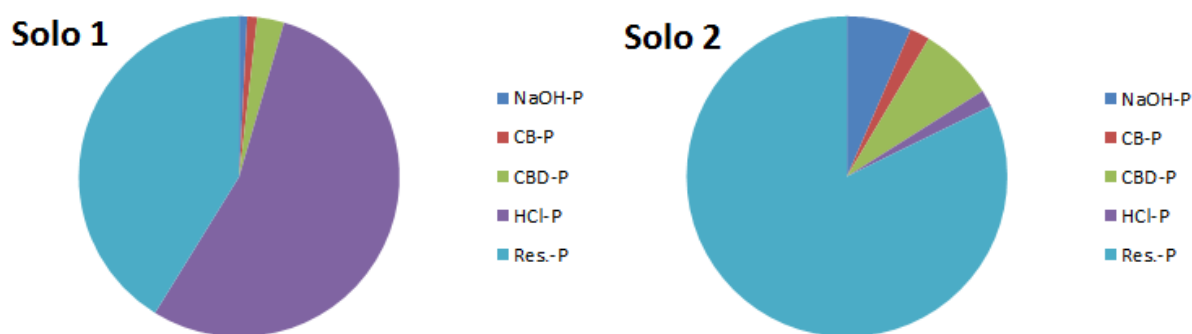
Em solos alcalinos e calcários a baixa disponibilidade de P foi atribuída às reações de adsorção e precipitação do P com cálcio ou ferro e componentes de alumínio do solo (BRADY e WEIL, 2008).

Analisando os teores de P total nos solos, temos os maiores valores nos solos solódicos (campo, solos 1 e 2) e os menores nos solos sódicos (solos 3 e 4), variando de 12,8 a 247,7 mg kg⁻¹, sendo o menor teor encontrado no solo 4 e o maior no solo 1 e a média de todos os solos de 103,2 mg kg⁻¹. Nota-se que o solo do experimento em campo e o solo 1, não apresentaram diferenças estatísticas, o que já era de se esperar, já que o solo 1 utilizado nos vasos foi coletado da área experimental do campo. O solo 2 se apresentou diferente de todos os demais solos, ficando com o teor de P intermediário. Os solos 3 e 4, ambos sódicos, também não mostraram diferenças estatísticas quanto ao teor de P total e foram os solos com os menores teores do mesmo.

Em região de semiárido sob vegetação nativa, pesquisa com Latossolos e Luvisolos encontraram valores médios de 320 e 350 mg kg⁻¹, respectivamente de P total nos solos, resultados bem maiores dos encontrados no nosso trabalho. Os maiores teores de P encontrados nesse trabalho pode ser pelo fato de ter sido feito em área de vegetação nativa, onde ocorre alta ciclagem de nutrientes (ARAÚJO et al., 2004).

Através das figuras 7 e 8, podemos observar a dimensão das frações de P avaliadas em cada solo. As frações de P possuem diferenças quanto à mobilidade, biodisponibilidade e comportamentos químicos no solo e pode ser transformado em determinadas condições (SHARPLEY et al., 2000).

Figura 7 - Porcentagem das frações de P nos cambissolos solódicos (solos 1 e 2)



Fonte: Marques, R. P. (2013)

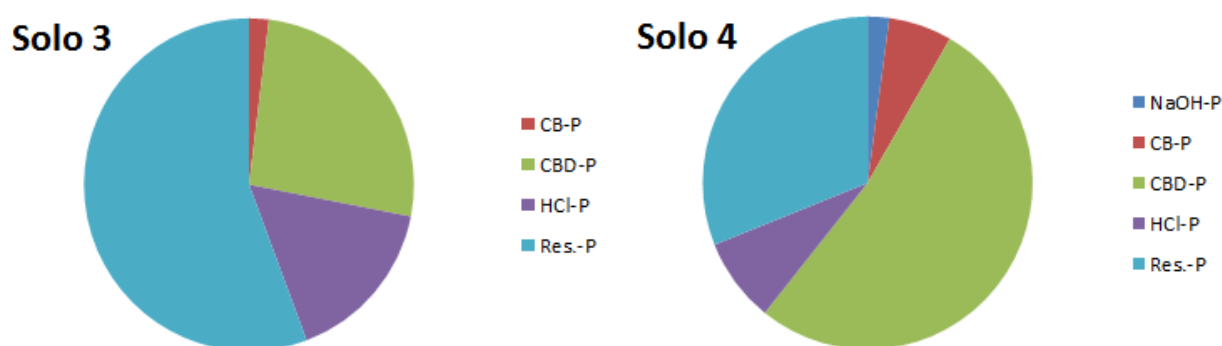
No solo 1 (Figura 7) a fração HCl-P corresponde a aproximadamente 55 % do P total tanto em campo quanto em vasos. Resultados esses que corroboram com Yu et al. (2006), que relataram que esta fração é responsável por 45-60 % do total de P nos solos neutros e alcalinos. Fracionamento de P realizado em região árida do México com solos também alcalinos, notaram que a fração de P-Ca domina sobre todas as outras frações, assim como ocorre no solo 1 do nosso estudo, testados tanto em condições de campo como em vasos (CARREIRA et al., 2006). Pesquisa realizada com o mesmo fracionamento em solos também alcalinos encontraram o P-Ca dominando em todos os solos, exceto nos mais arenosos (SHAHEEN et al., 2007), diferente do que podemos observar nessa pesquisa, já que o solo mais arenoso entre os estudados é o solo 1, justamente o que aparece com P-Ca predominando.

Pode-se notar ainda que depois do P-Ca a fração P-residual predomina neste solo, corroborando com resultados de Araújo et al. (2004), que também percebeu essa mesma tendência trabalhando com Latossolos e Luvisolos de regiões semiáridas.

Já no solo 2 (Figura 7) o P residual aparece predominando, correspondendo a 82,1 % do P total, seguido por CBD-P (7,5 %), NaOH-P (6,5 %), CB-P (2 %) e HCl-P (1,7 %).

Os solos sódicos (Figura 8) mostram tendências diferentes, onde o solo 3 apresenta predominância do P residual (46 %), seguido da fração CBD-P (27,7 %), HCl-P (17,2 %) e CB-P (2 %). Podemos notar ainda que no solo 3, além da fração NaHCO₃-P ausente, como ocorreu em todos os solos, a fração NaOH-P também não foi mensurável. Sendo o P disponível para a planta representado nesse solo apenas pela fração CB-P (P-Ca lábil).

Figura 8 - Porcentagem das frações de P nos cambissolos sódicos (solos 3 e 4)



Fonte: Marques, R. P. (2013)

No solo 4 a fração predominante foi CBD-P (52 %), seguido de P residual (31 %), HCl-P (8,2 %), CB-P (6,2 %) e NaOH (2,1 %).

Em solo calcários foi realizada pesquisa que obtiveram a fração CB-P com teores não mensuráveis (HALAJNIA et al., 2009). Assim como Shaheen et al. (2007) em sua pesquisa com solos alcalinos encontraram valores de fração CB-P insignificantes ou não detectáveis na maioria dos solos estudados. Além disso, a fração CBD-P não foi detectada. Os autores concluíram com isso que os carbonatos desempenham um papel dominante nas transformações P nesses solos alcalinos. Estes resultados não se confirmam neste trabalho, já que encontramos teores mensuráveis das duas frações em todos os nossos solos. Podemos observar nas figuras 7 e 8, que à medida que os solos foram se tornando mais sódicos a fração CBD-P foi crescendo e tornando-se mais importante, principalmente no solo 4, onde CBD-P aparece dominando sobre as demais. Isso pode indicar que nos solos mais afetados por sódio, os carbonatos perdem um pouco a importância não sendo os responsáveis de forma dominante pelas transformações do P nesses solos.

No solo 4 o P-residual contribui com 31 % do P total. O mesmo é constituído pelo P que não foi extraído pelos extratores seletivos do fracionamento. Os teores de P nesta forma foram altos em comparação as outras formas, indicando que grande parte do P encontra-se em formas de alta energia de ligação com os colóides do solo. Essa fração representa o P fortemente retido em minerais como hematita, goetita e gibsita (SMECK, 1985).

Em condições de alto pH e alto teor de Ca trocável pode ocorrer um fenômeno denominado retrogradação, quando o P da solução precipita em formas de baixa solubilidade, levando a uma diminuição nesse compartimento e aumentando o compartimento de P na fonte mineral (MALAVOLTA, 1967). Tais informações levam a crer que essa seja a causa das altas concentrações de P residual nos solos 2, 3 e 4.

4.4 CORRELAÇÕES DAS FRAÇÕES DE P COM EXTRATORES, P NA PLANTA E COM CARACTERÍSTICAS DOS SOLOS.

Na análise de correlação de Pearson entre as frações de P e o P na planta, o experimento em campo apresentou correlações positivas significativas tanto do P-Ca lábil ($r=0,64^*$), quanto do P-Ca não-lábil ($r=0,54^\circ$) com o P na parte aérea da planta, sendo este um indicativo que a planta conseguiu absorver o P desses dois compartimentos. Já em condição de vaso, o solo 1, mostrou correlação positiva significativa do P na planta apenas com a fração de P-Ca lábil ($r=0,90^{**}$), indicando que essa foi a única forma de P, entre as frações estudadas, que a planta absorveu. Algumas plantas têm a capacidade de acidificar a rizosfera, esse comportamento pode fazer com que as formas de P-Ca não lábeis do solo sejam absorvidas (HEDLEY et al., 1982). Em semiárido Pernambucano, uma pesquisa concluiu que em áreas secas onde os solos são menos intemperizados, a fração P-Ca também pode contribuir para o tamponamento de formas mais lábeis de P no solo (ARAÚJO et al., 2004).

Nos solos sódicos as correlações do P absorvido pela planta com as frações de P-Ca foram negativas, tanto no solo 3 com o P-Ca lábil ($r=-0,84^{**}$) e P-Ca não-lábil ($r=-0,65^*$), quanto no solo 4 com P-Ca lábil ($r=-0,68^*$) e P-Ca não lábil ($r=-0,59^*$). Esses resultados são um indicativo que nesses solos essas não foram às formas de P que a planta conseguiu absorver. No solo 4 nota-se ainda correlação negativa significativa ($r=-0,50^\circ$) com o P residual, demonstrando que essa também não foi a forma de P absorvida pela planta.

Já na análise das frações de P com os extratores, temos no solo 2 o extrator Olsen apresentando correlação negativa ($r=-0,68^*$) com o P residual e positiva ($r=0,56^\circ$) com as fração de P-Fe lábil (NaOH-P), podendo este resultado indicar o motivo deste ter sido melhor

extrator para este solo (Tabela 7), já que o P residual é composto pelas frações mais estáveis do solo e teoricamente não é disponível a planta. Além disso, o solo 2 é o que aparece com o maior teor da fração de P-Fe lábil. Porém, as melhores correlações de Olsen ocorreram nos solos sódicos e esses possuem baixos teores da fração de P-Fe lábil, podendo outros fatores terem influenciado esses resultados. Rocha et al. (2005) em pesquisa com Cambissolos da Ilha de Fernando de Noronha verificou que os extratores Mehlich-3 e Olsen foram mais indicados que o Mehlich-1 para estimar o P-disponível nesses solos, onde foram encontradas predominantemente as forma P-Fe e P-Ca. Olsen é o extrator mais comum utilizado em solos alcalinos, e estima-se ser a fração de P no solo disponível para absorção pelas plantas (KUO, 1996). Kuo (1990) descobriu que o P extraído por Olsen é altamente dependente da capacidade de sorção de P.

Já no solo 4, o mais sódico, foram encontrados bons ajustes para 3 extratores (Mehlich-1, Olsen e Soltampour) no teste de disponibilidade (Tabela 6), e os mesmos apresentaram correlações positivas significativas com a fração de P-Ca não-lábil (0,57°; 0,53°; 0,62*, respectivamente). O P recuperado pela planta também apresentou correlação com o P-Ca não-lábil, porém a mesma foi negativa ($r=-0,59^*$). Também no solo 4 o extrator Mehlich-1 apresentou correlação positiva significativa com o P residual ($r=0,52^\circ$), porém essa fração não apresentou correlação com P recuperado pela planta, indicando que nesse solo apesar dos extratores apresentarem bom ajuste no teste de disponibilidade (Tabela 6), os mesmos recuperaram formas de P que não foram acessíveis à planta. O P residual é uma parte altamente estável do conjunto total de P no solo, que está disponível para as plantas em longo prazo (CROSS e SCHLESINGER, 1995).

Foram testadas correlações das características do solo com as frações de P (Tabela 8).

Tabela 8 - Coeficientes de correlação de Pearson entre os teores das frações de P inorgânico e características dos solos.

Características do solo	pH	Ca	Prem	Na	Argila
Frações					
NaHCO ₃ -P	-0.0127 ^{n.s}	-0.1474 ^{n.s}	-0.0633 ^{n.s}	-0.1030 ^{n.s}	-0.0518 ^{n.s}
NaOH-P	-0.2653*	-0,6167**	0.2015°	-0.5104**	-0.4783**
CB-P	-0.3639**	-0.6000**	0.5555**	-0.4966**	-0.6595**
CBD-P	0.0912 ^{n.s}	0.0380 ^{n.s}	-0.1876 ^{n.s}	0.0561 ^{n.s}	0.1270 ^{n.s}
HCl-P	-0.5625**	-0.3144*	0.8083**	-0.4929**	-0.6527**
P-total	-0.6563**	-0.4982**	0.8183**	-0.6763**	-0.7720**
Res-P	-0.6147**	-0.5670**	0.6168**	-0.7276**	-0.7036**
Planta	-0.5119**	-0.2512*	0.2129°	-0.5951**	-0.3115*

Fonte: Marques, R. P. (2013).

** Significativo a 1% de probabilidade. * Significativo a 5% de probabilidade. ° Significativo a 10% de probabilidade. ^{n.s} Não significativo.

O P total correlacionou-se positivamente ($r = 0,81^{**}$) apenas com o Prem entre as características do solo. As demais características (pH, Ca^{2+} , Na^+ e Argila) correlacionaram-se negativamente com o P total, indicando a diminuição da disponibilidade de P como o aumento de pH e com a elevação dos teores de argila. Essa correlação negativa com a argila é o oposto do verificado por Shaheen et al. (2007), que obteve correlação positiva do P total com a argila ($r = 0,75^*$). Esse resultado também é o oposto do verificado por McCullum (1996) e Mengl Kirkley (1987), que relataram que o P está associado as frações mais finas do solo. Esse fato pode ter ocorrido devido aos baixos valores de argila nos solos testados e da predominância da precipitação frente as reações de adsorção nesses solos.

Todas as correlações significativas do Na foram negativas, e essas ocorreram com as frações; P-Fe lábil, P-Ca lábil, P-Ca não lábil, P total, P residual e P absorvido pela planta; sendo que a maior ocorreu com o P residual ($r = -0,72^{**}$), indicando que quanto mais sódico for o solo, menor será o teor de P no solo, principalmente nas frações mais estáveis do solo (P residual), e maior será a dificuldade de absorção do P pela planta.

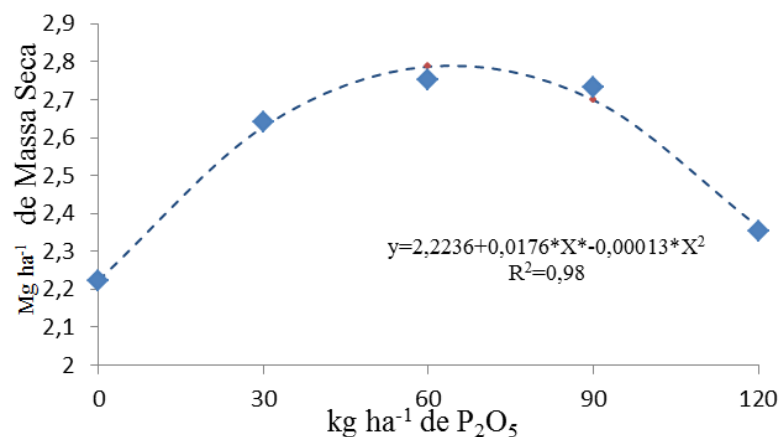
4.5 PRODUTIVIDADE E VARIÁVEIS BIOMÉTRICAS DO SORGO

A produtividade do sorgo variou entre 14,9 a 20,9 $Mg\ ha^{-1}$ de massa fresca, e não apresentou diferenças significativas entre as doses de P e nem foi possível encontrar ajuste de regressão. Essa produtividade foi abaixo da média encontrada por outros pesquisadores que foi de 24,8 a 37,8 $Mg\ ha^{-1}$ (TOMICICH et al., 2004). Já que as doses crescentes de P não influenciaram essa variável, a baixa produtividade foi ocasionada provavelmente pela combinação da condição de solo alcalino com a irrigação com água salobra. Vários estudos têm mostrado que no semiárido do Nordeste brasileiro, as águas de irrigação, em muitos casos, possuem altas concentrações de sais, contribuindo para acelerar os problemas relacionados à salinidade e sodicidade, reduzindo a produção agrícola nessas áreas irrigadas (COSTA et al. 1982; LARAQUE, 1989; MEDEIROS, 1992).

Na análise de massa seca (MS) do sorgo no campo, foi possível ajustar um modelo de regressão significativo ($R^2 = 0,98$) entre o P aplicado e a MS do sorgo, porém não ocorreu diferenças estatísticas na MS sob doses crescentes de P (Figura 9). Resultados que não corroboram com Cruz et al. (2009), que verificaram incrementos na produção de MS de sorgo em função da adubação fosfatada. Diante desse resultado, o solo estudado deve efetivamente

apresentar teores suficientes para a cultura, assim como observado pela extração com Mehlich-1, antes mesmo da adubação (Tabela 4).

Figura 9 - Produtividade do sorgo em campo em Mg ha^{-1} de massa seca em função das doses crescentes de P



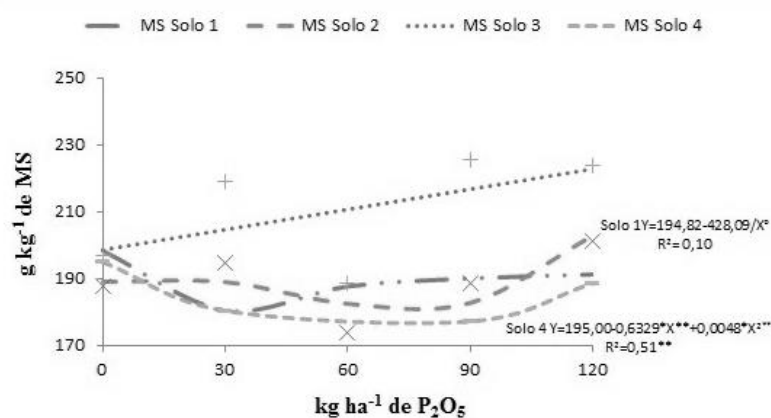
Fonte: Marques, R. P. (2013)

A produtividade do sorgo ficou em torno de $2,5 \text{ Mg ha}^{-1}$ de MS. Valores bem abaixo da produtividade média esperada, que é de 8 Mg ha^{-1} (COMISSÃO ESTADUAL DE FERTILIDADE DO SOLO, 2008). Essa produtividade abaixo da média pode ter ocorrido pela junção de diversos fatores como água de irrigação de má qualidade e excesso de sais no solo. Pesquisas com genótipos de sorgo sudão em solos não salinos, obtiveram a produção de MS colhida 57 dias após o plantio variando $3,5$ a $5,8 \text{ Mg ha}^{-1}$ (TOMICICH et al., 2004).

Trabalhos realizados com pinhão-mansó sob diferentes níveis de salinidade encontraram decréscimo de MS de até 64 % (SILVA et al., 2009). Essas reduções constatadas, devido concentrações crescentes de salinidade, são atribuídas ao efeito osmótico, à toxicidade pela absorção excessiva dos íons Na^+ e Cl^- e ao desequilíbrio nutricional causado pelos distúrbios na absorção dos nutrientes essenciais (RODRIGUES, 2007).

Analisando posteriormente a MS do sorgo nos vasos (Figura 10), nota-se que apesar de terem sido encontrados ajustes de regressão para as doses de P em relação à produtividade (solos 1 e 4), as doses crescentes de P não tiveram influência sobre a produtividade do sorgo. Apesar disso, nota-se ainda que no solo 3, ocorreu uma tendência de aumento no teor de MS do sorgo com aumento das doses de P, justamente no solo onde a caracterização (tabela 4), mostrou o menor teor de P antes da adubação fosfatada.

Figura 10 - Modelo de regressão do teor de massa seca do Sorgo em condições de vasos com diferentes solos

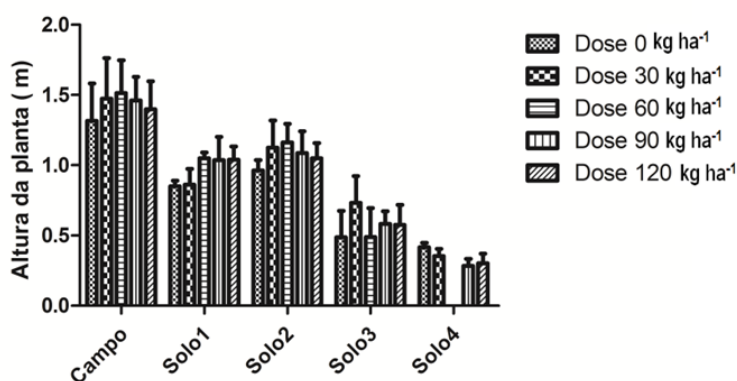


Fonte: Marques, R. P. (2013)

No solo 1 a produtividade variou entre 181 a 198, no solo 2 entre 173 a 201, no solo 3 de 188 a 225 e no solo 4 de 177 a 197 g kg⁻¹ de massa seca do Sorgo.

Na análise da altura de plantas foram encontradas diferenças entre os solos, porém entre as doses só foi possível perceber diferenças nos solos 1 e 2 dos vasos, onde os tratamentos com presença de adubação fosfatada, independente da dose, apresentaram maior altura (Figura 11).

Figura 11- Diferença de altura de planta em função das doses de fósforo em cada solo testado



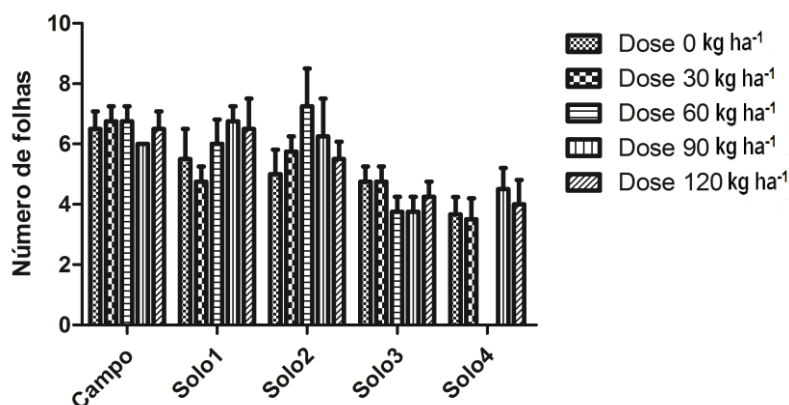
Fonte: Marques, R. P. (2013)

Nos solos 1 e 2, as plantas se apresentaram mais altas que nos solos 3 e 4, sendo o campo com altura ainda maior. Vale destacar que os solos 3 e 4 são sódicos com elevada PST

de 46,49 e 73,65, respectivamente. Os valores abaixo de 2,3 m, média de altura do sorgo Sudão (IPA, 2000), são um indicativo que os sais em excesso presentes nos solos prejudicaram o desenvolvimento das plantas, levando as mesmas a não refletirem todo seu potencial genético. No semiárido pernambucano, pesquisas realizadas com diferentes genótipos de sorgo, encontraram 18 genótipos forrageiros com altura que variaram entre 2,37 e 2,56 m (MONTEIRO et al., 2004). Mesmo sendo encontrados valores médios de altura abaixo da média esperada, esses resultados ainda podem ser considerados significativos, pois em trabalhos realizados com 23 genótipos de sorgo sudão em solos não salinos em regime de corte, encontraram a altura variando de 1,48 a 1,70 m, valores próximos aos encontrados em condições de campo nessa pesquisa (TOMICH et al., 2004).

Para o número de folhas ocorreu o mesmo comportamento, com a única diferença que o campo não diferenciou dos solos 1 e 2 (figura 12). Nota-se que nos solos sódicos as variáveis biométricas foram mais afetadas negativamente que nos outros solos. O número de folhas nos solos solódicos ficou em torno de seis, enquanto que nos sódicos ocorreu um decréscimo ficando em torno de quatro folhas por planta.

Figura 12- Diferença de número de folhas de planta em função das doses de fósforo em cada solo testado



Fonte: Marques, R. P. (2013)

Segundo pesquisas realizadas com sorgo forrageiro as plantas submetidas ao estresse salino, apresentaram uma produção 5 % menor na dose mais elevada de P em relação à menor dose do elemento (LACERDA et al., 2006), levando a crer que em condições de salinidade níveis muito altos de P, podem levar a uma queda de produtividade ocasionada por toxicidade. Os autores sugerem que em condições de salinidade as plantas podem crescer

com níveis mais baixos de P no meio nutritivo e que níveis supra ótimos desse nutriente podem ser alcançados mais rapidamente em plantas submetidas a estresse salino do que em plantas cultivadas em meio não salino (NIEMAN e CLARK, 1976; ROBERTS et al., 1984; MARSCHNER, 1995).

5 CONCLUSÕES

1. O melhor extrator entre os testados foram os neutros e os moderadamente alcalinos, ou seja, Olsen e Soltampour.
2. Os solos apresentaram maiores teores de P no compartimento não-lábil, seguido pelas frações pouco lábeis e lábeis. A fração predominante no solo 1 foi HCl-P > P-residual > CBD-P; no solo 2 foi P-residual > CBD-P > NaOH-P; no solo 3 P-residual > CBD-P > HCl-P; e no solo 4 CBD-P > P-residual: HCl-P, indicando que à medida que os solos foram se tornando mais sódicos a fração CBD-P foi crescendo e tornando-se mais importante
3. No geral os extratores Olsen e Soltampour correlacionaram com as frações CB-P e HCl-P, sendo essas as responsáveis pelo P-Disponível nestes solos.
4. No campo, as correlações das frações de P-Ca lábil ($r=0,64^*$) e do P-Ca não-lábil ($r=0,54^\circ$) com o P absorvido pela planta, indica que a planta conseguiu absorver o P desses dois compartimentos.
5. A produtividade e as variáveis biométricas apresentaram valores abaixo da média esperada para a cultura.
6. A produtividade do sorgo foi mais afetada pela condição de salinidade do solo do que pela adubação fosfatada.

REFERÊNCIAS

- ALLEN, R. G. et al. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**, Rome: FAO, Irrigation and Drainage Paper 56: 301 p, 1998.
- ALVAREZ, V. H. ET al. Determinação e uso do fósforo remanescente. **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 25, n. 25, p. 27-32, 2000. (Boletim Informativo).
- ARAÚJO, M. S. B.; SALCEDO, I. H. Formas preferenciais de acumulação de fósforo em solos cultivados com cana-de-açúcar na região nordeste. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 21, n. 4, p. 643-650, 1997.
- ARAÚJO, M. S. B.; SCHAEFER, C. E. G. R.; SAMPAIO, E. V. B. Frações de fósforo após extrações sucessivas com resina e incubação, em Latossolos e Luvisolos do semi-árido de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 28, n. 2, p. 259-268, 2004.
- BARBANTI, L. et al. Sweet and fibre sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench), energy crops in the frame of environmental protection from excessive nitrogen loads. **European Journal of Agronomy**, Itália, v. 25, n. 1, p. 30-39, 2006.
- BATAGLIA, O. C. et al. **Métodos de análise química de plantas**. Campinas: Instituto Agrônomo, 1983. 48 p. (Boletim Técnico, 78).
- BATISTA, M. J. et al. **Drenagem como instrumento de dessalinização e prevenção da salinização de solos**. 2.ed. ver. ampl. Brasília, DF: CODEVASF, Ministério do Meio Ambiente, 2002. 216 p. (Série Informes Técnicos).
- BONFIM, E. M. S. et al. Níveis críticos de fósforo para *brachiaria brizanthae* suas relações com características físicas e químicas em solos de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 28, n. 2, p. 281-288, 2004.
- BOWMAN, R. A.; COLE, C. V. Transformation of organic phosphorus substrates in soil as evaluated by NaHCO₃ extraction. **Soil Science**, Baltimore, v. 125, n. 1, p. 95-101, 1978.
- BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **The Nature and Properties of Soils**. 14th ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall, 2008. 975 p.
- CARREIRA, J. A.; VIÑEGLA, B.; LAJTHA, K. Secondary CaCO₃ and precipitation of P-Ca compounds control the retention of soil P in arid ecosystems. **Journal of Arid Environments**, Boston, USA, v. 64, n. 3, p. 460-473, 2006.
- CASSAGNE, N. et al. Forms and profile distribution of soil phosphorus in alpine Iceptisols and Spodosols (Pyrennes, France). **Geoderma**, Amsterdam, v.95, n.2, p. 161-172, 2000.
- CECATO, U. et al. Influencia das adubações nitrogenadas e fosfatada sobre a produção e característica da rebrota do capim-Marandu (*Brachiária Brizantha* Hochst Stapf cv Marandu).

Acta Scientiarum, Maringá, v. 26, n. 3, p. 399-407, 2004.

CHANG, S. C.; JACKSON, M. L. Fractionation of soil phosphorus. **Soil Science Society of America Journal**, Baltimore, v. 84, n. 1, p. 133-144, 1957.

COMISSÃO ESTADUAL DE FERTILIDADE DO SOLO. **Recomendação de adubação para o estado de Pernambuco: 2ª aproximação**. Recife, 2008. 212 p.

CONSELHO NACIONAL DE RESERVA DA BIOSFERA DA CAATINGA. **Cenários para o bioma Caatinga**. Recife: Secretaria de Ciência, Tecnologia e Meio Ambiente, 2004. 283p.

COSTA, J. P. V. et al. Fluxo difusivo de fósforo em função de doses e da umidade do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v. 10, n. 4, p. 828-835, 2006.

COSTA, P. H. A. da et al. Crescimento e níveis de solutos inorgânicos em cultivares de *Vigna unguiculata* submetidos à salinidade. **Revista Brasileira de Botânica**, São Paulo, v.26, n. 3, p. 289-297, 2003.

CROSS, A. F.; SCHLENSIGER, H. A. A literature review and evaluation of the Hedley fractionation: Applications to the biochemical cycle of soil phosphorus in natural ecosystems. **Geoderma**, Amsterdam, v. 64, p. 197-214, 1995.

CRUZ, S. J. S. et al. Adubação fosfatada para a cultura do sorgo granífero. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 22, n. 1, p. 91-97, 2009.

DELGADO, A.; TORRENT, J. Phosphorus forms and desorption patterns in heavily fertilized calcareous and limed acid soils. **Soil Science Society of America Journal**, Baltimore, v. 64, n. 6, p. 2031-2037, 2000.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, DF: SPI; CNPS, 1999. 412 p.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análises de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura e do Abastecimento, 1997. , 212 p.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 2006. 306 p.

FREIRE, M. B. G. S. e FREIRE, F. J. Fertilidade do solo e seu manejo em solos afetados por sais. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (eds). **Fertilidade do Solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. cap. 16, p. 929-954.

GATIBONI, L. C. et al. Biodisponibilidade de formas de fósforo acumuladas em solo sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 31, n. 4, p. 691- 699, 2007.

GHEYI, H. R. Problemas de salinidade na agricultura irrigada. In: OLIVEIRA, T. et al. (Ed.). **Agricultura, sustentabilidade e o semi-árido**. Fortaleza: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. cap. 16, p. 329-345.

HALAJNIA, A. et al. Phosphorus fractions in calcareous soils amended with P fertilizer and cattle manure. **Geoderma**, Amsterdam, v. 150, n. 1, p. 209-213, 2009.

HARRELL, D. L.; WANG, J. J. Fractionation and sorption of inorganic phosphorus in Louisiana calcareous soils. **Soil Science Society of America Journal**, Baltimore, v.171, n. 1, p. 39-51, 2006.

HEDLEY, M. J.; STEWART, J. W. B.; CHAUHAN, B. S. Changes in organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. **Soil Science Society of America Journal**, Baltimore, v. 46, n. 5, p. 970-976, 1982.

HOLANDA, J. S. et al. Qualidade da água para irrigação. In: GHEYI, R. H.; DIAS, N. S.; LACERDA, C. F. **Manejo da salinidade na agricultura: estudos básicos e aplicados**. Fortaleza: INCT Sal, 2010. cap. 4, p. 43-59.

HOLFORD, I. C. R. Differences in the efficacy of various soil phosphate tests for white clover between very acid and more alkaline soils. **Australian Journal of Soil Research**, Australia, v. 21, n. 2, p. 173-182, 1983.

HORNEY, R. D. et al. Development of practical site-specific management methods for reclaiming salt-affected soil. **Computers and Electronics in Agriculture**, Califórnia, v. 46, p. 379-397, 2005.

IGARTUA, E.; GRACIA, M. P.; LASA, J. M. Field responses of grain sorghum to a salinity gradient. **Field Crops Research**, Países Baixos, v. 42, n. 1, p. 15-25, 1995.

INSTITUTO AGRONÔMICO DE PERNAMBUCO. **Sorgo sudão: Sudan 4202 - cultivar tolerante à salinidade e com aptidão para feno**. Recife, [s.d.]. Folder. 2000.

IPA – TABOSA, J. N. et al. O cultivo do sorgo no semi-árido de Pernambuco: aspectos gerais e recomendações básicas de plantio. **Publicações/Folhetos Explicativos**. p. 5. 2008.

JALALI, M.; RANJBAR, F. Aging effects on phosphorus transformation rate and fractionation in some calcareous soils. **Geoderma**, Amsterdam, v. 155, n. 1, p. 101-106, 2010.

KUO, S. Phosphate sorption implications on phosphate soil tests and uptake by corn. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 54, n. 1, p. 131-135, 1990.

KUO, S. Phosphorus. In: SPARKS, D. L. (Ed.). **Methods of Soil Analysis: Soil Science Society of America Journal**. Madison, v. 5, p. 869-920, 1996.

LACERDA, C. F. et al. Interação entre salinidade e fósforo em plantas de sorgo forrageiro. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, CE, v. 37, n. 2, p. 258-263, 2006.

LARAQUE, A. **Estudo e previsão da qualidade química da água dos açudes do nordeste**. Recife: SUDENE, 1989. (Série Hidrológica, 26).

LEAL, I. G. et al. Fitorremediação de solo salino-sódico por *AtriplexNummulariae* gesso de jazida. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, n. 3, p. 1065-1072, 2008.

MALAVOLTA, E. **Manual de química agrícola: adubos e adubação**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1967. 606 p.

MALIK, M. A.; KHAN, K. S. Phosphorus fractions, microbial biomass and enzyme activities in some alkaline calcareous subtropical soils. **African Journal of Biotechnology**, Paquistão, v. 11, n. 21, p. 4773-4781, 2012.

MARIA S. B. et al. Soil phosphorus fractions from toposequences of semi-arid Latosols and Luvisols in northeastern Brazil. **Geoderma**, Amsterdam, v. 119, n. 3, p. 309-321, 2004.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2. ed. London: Academic Press, 1995. 889 p.

MCCULLUM, R. E. Soil phosphorus and potassium. In: BRADY, N. C.; WEIL, R. R.; WEIL, (Ed.). **The nature and properties of soils**. 2nd ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall International, 1996. cap. 14, p. 445-487.

MEDEIROS, J. F. **A qualidade da água de irrigação e evolução de salinidade nas propriedades assistidas pelo “GAT” nos Estados do RN, PB e CE**. 1992. 173 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, PB.

MENGEL, K.; KIRKBY, E. A. **Principles of plant nutrition**. Bern: International Potash Institute, 1987. 667 p.

MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO AGRÁRIO. Secretaria de Desenvolvimento Territorial. **Plano territorial de desenvolvimento rural sustentável do sertão do pajeú**. 2011. 141 p.

MIRANDA, A. P. **Crescimento, composição mineral e sintomas visuais de deficiências de macronutrientes em plantas de *AlpiniaPurpurata* Cv. Jungle King**. 2007. 77 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém.

MIRANDA, N. O. de et al. Sorgo forrageiro em sucessão a adubos verdes na região de Mossoró, RN. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, PE, v. 5, n. 2, p. 202-206, 2010.

MONTEIRO, M. C. D. et al. Avaliação do desempenho de sorgo forrageiro para o semi-árido de Pernambuco. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v. 3, n. 1, p. 52-61, 2004.

- MOURA, M. S. B.; SA, I. I. S. Variação espacial da precipitação e temperatura do ar no Submédio São Francisco. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 14., 2006, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 2006.
- NIEMAN, R. H.; CLARK, R. A. Interactive effects of salinity and phosphorus nutrition on the mature photosynthesizing corn leaves. **Plant Physiology**, Califórnia, v. 57, n. 2, p. 57-161, 1976.
- NOVAIS, R. F. de.; SMYTH, T. J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa, MG: UFV; DPS, 1999. 399 p.
- NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J.; NUNES, F. N. Fósforo. In: NOVAIS, R. F. et al. **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. cap. 8, p. 471-550.
- OLSEN, S. L.; SOMMERS, L. E. Phosphorus. In: PAGE, A. L. (Ed.). **Methods of soil analysis**. 2nd ed. Madison WI: ASA and SSSA, 1982. Part 2, v. 9, p. 403-427
- OLSEN, S. R. et al. **Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate**. Washington: USDA, 1954. 19 p. (Circular, 939).
- O'HALLORAN, I. P. Total and organic phosphorus. In: Soil Sampling and Methods of Analysis, ed. Carter, M. R.; Gregorich, E. G., **Canadian Society of Soil Science**. Lewis Publishers, New York, 1993. cap. 24, p. 213-229.
- QADIR, M. et al. Phytoremediation of sodic and saline-sodic soils. **Advances in Agronomy**, Newark, v. 96, n. 1, p. 197-247, 2007.
- RICHARDS, L. A. **Diagnosis and improvement of saline and alkali soils**. Washington DC, US: Department of Agriculture, 1954. 160 p. (USDA Agricultural Handbook, 60)
- ROBERTS, J. K. M. et al. Salt stimulation of phosphate uptake in maize root tips studies by ³¹P nuclear magnetic resonance. **Plant Physiology**, Rockville, v. 74, n. 4, p. 947-950, 1984.
- ROCHA, A. T. et al. Fracionamento do fósforo e avaliação de extratores do P-disponível em solos da Ilha de Fernando de Noronha. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 9, n. 2, p. 178-184, 2005.
- RODRIGUES, C. R. F. **Efeitos do cloreto de sódio sobre o crescimento e acumulação de nutrientes da mamoneira**. 2007. 78 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.
- ROTTA, L. R.. **Fracionamento e disponibilidade de fósforo em uma cronosequência de cultivos sob plantio direto**. 2012. 72 p. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia.
- SAIRAM, R. K.; TYAGI, A. Physiology and molecular biology of salinity stress tolerance in plants. **Current Science**, New Delhi, India, v. 86, n. 3, p. 407-421, 2004.

SCHLINDWEIN, J. A.; GIANELLO, C. Calibração de métodos de determinação de fósforo em solos cultivados sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, n. 5, p. 2037-2049, 2009.

SHAHEEN, S. M; TSADILAS, C. D; STAMATIADIS, S. Inorganic phosphorus forms in some entisols and aridisols of Egypt. **Geoderma**, Amsterdam, v. 142, n. 1, p. 217-225, 2007.

SHARPLEY, A. N.; FOY, R. J.; WITHERS, P. J. A. Practical and innovative measures for the control of agricultural losses to water: an overview. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 29, n. 1, p. 1-9, 2000.

SILVA, E. N. et al. Acúmulo de íons e crescimento de pinhão-mansô sob diferentes níveis de salinidade. **Revista Ciência Agrônômica**, Fortaleza, CE, v. 40, n. 2, p. 240-246, 2009.

SILVA, E. M. B. et al. Níveis críticos de fósforo para *Braquiaria brizantha* e suas relações com características físicas e químicas em solos de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 28, p. 281-288, 2004.

SMECK, N. E. Phosphorus dynamics in soils and landscapes. **Geoderma**, Amsterdam, v. 36, n. 2, p. 185-189, 1985.

SOUZA JÚNIOR, R. F. et al. Frações de fósforo inorgânico do solo e suas correlações com o fósforo quantificado por extratores e pelo milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 36, p. 159-169, 2012.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 3. ed. Porto Alegre: Artmed, 2004. 719 p.

TOMICH, T. R. et al. Potencial forrageiro de híbridos de sorgo com capim-sudão. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, Belo Horizonte, v. 56, n. 2, p. 258-263, 2004.

UNITED STATES SALINITY LABORATORY – USSL STAFF. **Diagnosis and improvement of saline and alkali soils**. Washington, U.S: Department of Agriculture, 1954. 160 p. (Handbook, 60).

VILLANI, E. M. A. et al. Difusão de fósforo em solos com diferentes texturas e níveis de umidade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 17, p. 343-347, 1993.

WILLADINO, L.; CÂMARA, T. Origen y naturaleza de los ambientes salinos. In: REIGOSA, M. J.; PEDROL, N.; SÁNCHEZ, A. **La Ecofisiologia vegetal: una ciência de síntesis**. Madri, Espanha: Editora Thomsom, 2005. cap. 10, p. 303-329.

WILLIAMS, J. D. H. et al. Fractionation of inorganic phosphate in calcareous lake sediments. **Soil Science Society of America Journal**, Baltimore, v. 35, n. 2, p. 250-255, 1971.

YU, S. et al. Surface runoff phosphorus (P) loss in relation to phosphates activity and soil P fractions in Florida sandy soils under citrus production. **Soil Biology and Biochemistry**, Flórida, v. 38, p. 619-628, 2006.