

Adubação fosfatada para cana-de-açúcar em solos representativos para o cultivo da espécie no Nordeste brasileiro

Djalma Euzébio Simões Neto⁽¹⁾, Alexandre Campelo de Oliveira⁽²⁾, Fernando José Freire⁽³⁾, Maria Betânia Galvão dos Santos Freire⁽³⁾, Emídio Cantídio Almeida de Oliveira⁽³⁾ e Alexandre Tavares da Rocha⁽⁴⁾

⁽¹⁾Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), Estação Experimental de Cana-de-açúcar de Carpina, Rua Ângela Cristina de Luna, Bairro Novo, CEP 55810-700 Carpina, PE, Brasil. E-mail: desn@oi.com.br ⁽²⁾UFRPE, Unidade Acadêmica de Serra Talhada, Fazenda Saco, s/nº, Caixa Postal 63, CEP 56900-000 Serra Talhada, PE, Brasil. E-mail: alexandre_solos@hotmail.com ⁽³⁾UFRPE, Departamento de Agronomia, Rua Dom Manoel de Medeiros, Campus Universitário de Dois Irmãos, CEP 52171-900 Recife, PE, Brasil. E-mail: f.freire@depa.ufrpe.br, betania@depa.ufrpe.br, emidio@depa.ufrpe.br ⁽⁴⁾UFRPE, Unidade Acadêmica de Garanhuns, Avenida Bom Pastor, s/nº, Boa Vista, CEP 55292-270 Garanhuns, PE, Brasil. E-mail: alexandre@uag.ufrpe.br

Resumo – O objetivo deste trabalho foi avaliar a disponibilidade de P em solos representativos para o cultivo da cana-planta no Nordeste brasileiro, e estabelecer uma nova recomendação de adubação com o nutriente para a cultura nestes solos. O estudo foi realizado em cinco solos da Zona da Mata de Pernambuco: Argissolo Amarelo distrocoeso, Argissolo Amarelo distrófico, Latossolo Amarelo distrófico, Gleissolo Háptico eutrófico e Espodossolo Humilúvico órtico. Avaliaram-se sete doses de P, determinadas quanto à capacidade máxima de adsorção de P de cada solo (fósforo remanescente, P-rem). Aos 30 dias após a fertilização, os teores de P nos solos foram determinados com os extratores Mehlich-1, Mehlich-3, Bray-1 e resina de troca aniônica. Os níveis críticos de P foram calculados para cada solo e extrator. A partir dos intervalos de disponibilidade de P, foram definidas cinco classes de fertilidade para diferentes conteúdos de argila nos solos: muito baixa, baixa, média, alta e muito alta. Mehlich-1 e a resina de troca aniônica são os extratores capazes de representar adequadamente a disponibilidade P, para o cultivo de cana-planta nos solos avaliados.

Termos para indexação: *Saccharum*, capacidade máxima de adsorção, disponibilidade de fósforo, fertilidade do solo, nível crítico, recomendação de adubação.

Phosphorus fertilization for sugarcane in representative soils for cultivating this species in the Brazilian Northeast

Abstract – The objective of this work was to evaluate P availability in representative soils for plant cane cultivation in the Brazilian Northeast region, and to establish a new P-fertilizing recommendation for this crop in these soils. The study was done in five soil types, in Zona da Mata of Pernambuco: Argissolo Amarelo distrocoeso (Ultisol), Argissolo Amarelo distrófico (Ultisol), Latossolo Amarelo distrófico (Oxisol), Gleissolo Háptico eutrófico (Gleisol), and Espodossolo Humilúvico órtico (Spodosol). Seven P doses were evaluated for maximum P adsorption capacity of each soil (solution equilibrium phosphorus, P-rem). Thirty days after soil fertilization, P contents in soils were determined with the extractors Mehlich-1, Mehlich-3, Bray-1, and anion exchange resin. P critical levels were calculated for each soil and extractor. From P availability ranges, five fertility classes were defined for different clay contents in the soils: very low, low, medium, high, and very high. Mehlich-1 and anion exchange resin are able extractors to adequately represent soil-P availability for plant cane cultivation in the evaluated soils.

Index terms: *Saccharum*, maximum adsorption capacity, phosphorus availability, soil fertility, critical levels, fertilizer recommendation.

Introdução

Entre os fatores externos que influenciam a resposta das culturas à adubação fosfatada, a umidade, a mineralogia e a textura do solo são fundamentais para se determinar a disponibilidade de P para as plantas (Santos et al., 2008; Souza Júnior et al.,

2012; Oliveira et al., 2013) e o potencial produtivo do canavial (Cerri & Magalhães, 2012). Portanto, a recomendação de adubação com P deve considerar não apenas os teores disponíveis do nutriente, mas também características do solo que possam prever seu fator capacidade de fósforo (FCP) (Schlindwein & Gianello, 2009).

O manual de recomendações de adubação para o Estado de Pernambuco não leva em consideração as características químicas ou físicas dos solos que refletem o FCP, como o fazem a capacidade máxima de adsorção de P (CMAP), os teores de argila ou o P remanescente (P-rem). No manual, o extrator recomendado para avaliar a disponibilidade de P é o Mehlich-1, sabidamente sensível a esses fatores. Portanto, é provável que as recomendações desse manual sejam adequadas para solos intermediários, medianamente tamponados, com teores de argila entre 15 e 35%, ou com valores de 17 a 35 mg L⁻¹ de P-rem, predominantemente cauliniticos. No entanto, quando os solos se afastam desses indicadores médios, certamente as recomendações serão sub ou superestimadas. O teor de argila e o P-rem são características facilmente determinadas nos laboratórios de fertilidade do solo e permitem a interpretação dos níveis de disponibilidade de P no solo, tanto em estudos de adsorção de P no solo como no estabelecimento da resposta à fertilização fosfatada (Alves & Lavorent, 2004; Bortolon & Gianello, 2008).

Para a recomendação de doses adequadas de P, os teores do nutriente no solo, que definirão os diferentes intervalos de interpretação de sua disponibilidade para as plantas, devem ser obtidos de extrator químico que possua correlação significativa com o conteúdo de P na planta e, em alguns casos, com atributos químicos e físicos do solo, como o Mehlich-1 (Simões Neto et al., 2009). Contudo, a eficiência de extratores na predição do P disponível e o uso de níveis críticos, para recomendar adubação fosfatada, carecem de informações mais atualizadas, principalmente para solos cultivados com cana-de-açúcar no Nordeste brasileiro. Nesta região, as recomendações de P para cana-de-açúcar baseiam-se nos trabalhos de Marinho & Albuquerque (1978), em Alagoas, e de Sobral & Lira (1989), em Pernambuco. Estes autores, apesar de terem se preocupado com a produtividade esperada, não consideraram a influência do FCP na disponibilidade de P. Além disso, o uso de variedades mais produtivas e mais eficientes quanto à utilização do P do solo também deve ser contemplada na recomendação da adubação fosfatada (Simões Neto et al., 2011).

O objetivo deste trabalho foi avaliar a disponibilidade de P, em solos representativos para o cultivo da cana-planta no Nordeste brasileiro, e estabelecer uma nova recomendação de adubação com o nutriente para a cultura nestes solos.

Material e Métodos

A pesquisa foi realizada na região canavieira da Zona da Mata, no Estado de Pernambuco, em quatro áreas agrícolas pertencentes a usinas de álcool, e na Estação Experimental de Cana-de-açúcar de Carpina (EECAC) da Universidade Federal Rural de Pernambuco. Os solos destas áreas pertencem a diferentes classes, segundo critérios de Santos et al. (2013), são comuns no Nordeste brasileiro, predominantes em Pernambuco e, geralmente, utilizados para o cultivo de cana-de-açúcar (Tabela 1).

Os atributos químicos e físicos dos solos foram determinados para a camada de 0,0 a 0,2 m de profundidade (Tabela 2), conforme recomendações de Donagema et al. (2011). O P-rem foi obtido a partir dos procedimentos sugeridos por Alvarez V. et al. (2000) e, para a determinação da CMAP, fez-se uso da isoterma de Langmuir, de acordo com os procedimentos descritos em Alvarez V. & Fonseca (1990). A caracterização mineralógica da fração argila foi feita por meio de difratometria de raios-X (Whitting & Allardice, 1986), tendo-se identificado os minerais predominantes. Os teores de Fe amorfo (Feo) e cristalino (Fed) no solo foram obtidos, respectivamente, por meio de extratos com oxalato ácido de amônio e com ditionito/citrato/bicarbonato de sódio (Schwertmann & Taylor, 1989). Sua dosagem foi feita por espectrofotometria de absorção atômica.

As doses de P foram estabelecidas a partir de sete níveis de saturação da CMAP dos solos (0, 2, 4, 8, 12, 16 e 20%). Assim, as doses variaram de: 0,0 a 132 kg ha⁻¹ de P (não de P₂O₅), no Argissolo Amarelo distrocoeso (PAdx); de 0,0 a 255,5 kg ha⁻¹, no Latossolo Amarelo distrófico (LAd); de 0,0 a 316 kg ha⁻¹, no Argissolo Amarelo distrófico (PAd); de 0,0 a 328 kg ha⁻¹, no Gleissolo Háptico eutrófico (GXve); e de 0,0 a 40 kg ha⁻¹, no Espodossolo Humilúvico órtico (EKO). Nos ensaios, utilizou-se um delineamento experimental de blocos ao acaso, com quatro repetições. Cada parcela constituiu-se de sete linhas, espaçadas de 1 m entre si, com 10 m de comprimento, no total de 70 m². A área útil das parcelas constituiu-se das três linhas centrais, com exclusão de 1 m em cada extremidade (24 m²).

O preparo do solo foi realizado com uso de grade aradora que, nos solos LAd, PAd e GXve, foi utilizada na incorporação de, respectivamente, 3,0, 2,0 e 2,0 Mg ha⁻¹ de calcário dolomítico, com PRNT de 95%,

30 dias antes do plantio. A correção da acidez não foi necessária nos solos PAdx e EKo. Após a gradagem pesada, utilizaram-se grade niveladora e sulcador de aivecas de duas linhas.

No plantio, a adubação correspondeu à aplicação de 40 e 100 kg ha⁻¹ de N e K (não de K₂O), respectivamente, aplicados juntamente com as doses de P avaliadas, no fundo do sulco de plantio. As fontes utilizadas foram, respectivamente, sulfato de amônio, cloreto de potássio e superfosfato triplo. A quantidade de corretivos e a adubação de plantio teve como base o Manual de recomendações de adubação para o Estado de Pernambuco (Recomendações de adubação para o Estado de Pernambuco, 2008), que utiliza a neutralização do Al trocável ou a elevação dos teores trocáveis de Ca+Mg como critério para calcular a necessidade de calagem.

A precipitação pluvial durante o experimento variou de 998,8 mm, no ensaio conduzido no solo PAdx, a 2.648,0 mm no solo LAd. Nos ensaios em que a precipitação pluvial não foi suficiente, realizaram-se irrigações suplementares. Utilizou-se o sistema de cultivo com cana de um ano e meio, e as atividades de manejo iniciaram-se em agosto e finalizaram-se em dezembro do ano seguinte.

Aos 30 dias após aplicação dos tratamentos, três amostras simples (Broggi et al., 2010b; Freitas et al., 2013) foram coletadas a 0,25 m da parcela útil. Essas três amostras constituíram a amostra composta de cada parcela. O teor de P foi determinado com os seguintes extratores: Mehlich-1 (HCl 0,05 mol L⁻¹ + H₂SO₄ 0,0125 mol L⁻¹); Mehlich-3 (NH₄F 0,015 mol L⁻¹ + CH₃COOH 0,2 mol L⁻¹ + NH₄NO₃ 0,25 mol L⁻¹ + HNO₃ 0,013 mol L⁻¹ + EDTA 0,001 mol L⁻¹); Bray-1 (HCl 0,025

mol L⁻¹ + NH₄F 0,03 mol L⁻¹); e resina de troca aniônica (RTA).

Os teores de P, obtidos com o uso dos diversos extratores, foram correlacionados às concentrações do nutriente nos seguintes componentes da parte área: ponteiro, folha verde, colmo e folha senescente. Além disso, o acúmulo de P na parte aérea da cultura também foi determinado. Amostras dos componentes da parte aérea foram trituradas em trituradora de capim e secas a 65–70 °C, em estufa com circulação forçada de ar, até a obtenção de massa constante. Em seguida,

Tabela 2. Características químicas e físicas dos solos avaliados⁽¹⁾.

Característica	PAdx	LAd	PAd	GXve	EkO
pH (H ₂ O 1:2,5)	5,20	4,10	4,80	4,90	5,55
pH (KCl 1:2,5)	4,00	3,60	3,80	3,60	4,40
H+Al (cmol _c dm ⁻³)	5,20	9,24	7,00	6,77	3,22
Al ³⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0,35	2,00	1,00	1,20	0,00
Ca ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	1,90	0,20	0,90	5,80	2,20
Mg ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0,50	0,20	0,50	2,20	0,50
Na ⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0,01	0,02	0,03	0,19	0,04
K ⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0,07	0,11	0,10	0,21	0,07
P (mg dm ⁻³)	2,83	0,02	0,70	4,18	2,17
CMap (mg cm ⁻³)	0,33	0,67	0,78	0,82	0,10
P-rem (mg L ⁻¹)	41,00	12,00	17,00	17,00	46,00
m (%)	12,36	79,03	39,46	12,50	0,00
V (%)	32,29	5,43	17,98	55,40	46,69
PST (%) ⁽³⁾	0,45	0,94	1,29	1,95	1,55
CTC _{efetiva} (cmol _c dm ⁻³)	2,83	2,52	2,53	9,60	2,81
CTC _{total} (cmol _c dm ⁻³)	7,68	9,76	8,53	15,17	6,03
Cu (mg dm ⁻³)	1,05	0,85	0,35	2,40	0,60
Fe (mg dm ⁻³)	76,40	140,30	190,15	215,00	52,40
Zn (mg dm ⁻³)	1,50	1,30	0,85	3,85	1,35
Mn (mg dm ⁻³)	6,20	1,12	1,15	52,00	5,60
C (g kg ⁻¹)	8,90	9,60	17,90	13,80	10,70
Areia (g kg ⁻¹)	785,8	311,6	539,20	51,60	855,80
Silte (g kg ⁻¹)	54,6	9,2	9,20	209,20	64,60
Argila (g kg ⁻¹)	159,6	679,2	451,60	739,20	79,60
Ds (Mg m ⁻³)	1,41	1,13	1,05	1,02	1,50
Dp (Mg m ⁻³)	2,67	2,63	2,67	2,56	2,63
α (Mg m ⁻³)	0,47	0,57	0,60	0,60	0,43
CC (g g ⁻¹)	0,09	0,35	0,25	0,66	0,06
PMP (g g ⁻¹)	0,05	0,19	0,17	0,21	0,02
Ks (cm h ⁻¹)	11,60	6,32	20,92	1,12	23,05

⁽¹⁾PAdx, Argissolo Amarelo distrocoeso; LAd, Latossolo Amarelo distrófico; PAd, Argissolo Amarelo distrófico, GXve, Gleissolo Háplico eutrófico; EkO, Espodossolo Humilúvico órtico; CMap, capacidade máxima de adsorção de fósforo; P-rem, fósforo remanescente; PST, percentagem de sódio trocável; α, porosidade total; CC, capacidade de campo; PMP, ponto de murcha permanente; KS, condutividade hidráulica em meio saturado.

Tabela 1. Identificação das classes dos solos para o cultivo de cana-planta e localização das áreas experimentais em municípios do Estado de Pernambuco.

Sigla	Classificação dos solos	Localização	Município
PAdx	Argissolo Amarelo distrocoeso	EECAC	Carpina
LAd	Latossolo Amarelo distrófico	Usina Cucaú	Rio Formoso
PAd	Argissolo Amarelo distrófico	Usina Pumaty	Joaquim Nabuco
GXve	Gleissolo Háplico eutrófico	Usina Salgado	Ipojuca
EkO	Espodossolo Humilúvico órtico	Usina ST	Goiana

EECAC, Estação Experimental de Cana-de-açúcar de Carpina. ST, Santa Tereza.

procedeu-se à moagem das amostras, para determinação da concentração de P na massa de matéria seca de cada componente. As amostras foram submetidas à digestão nitroperclórica e, no extrato, realizou-se a quantificação de P por colorimetria (Silva, 2009). Com os resultados sobre as concentrações de P nos componentes da parte aérea das plantas e a produção de matéria seca, foi possível calcular o acúmulo do nutriente nesses componentes.

A partir das análises químicas do solo e da produção relativa de cana-de-açúcar em função das doses aplicadas de P, foram obtidos os níveis críticos de P nos diferentes solos, para os diferentes extratores, de acordo com as etapas descritas a seguir.

A produtividade agrícola foi estimada em megagramas de cana por hectare (Mg ha^{-1}), após a obtenção da massa de colmos das plantas da área útil das parcelas, com o auxílio de dinamômetro, acrescida da massa de colmos das doze canas utilizadas para separação dos componentes da parte aérea.

Os teores de P no solo e a produção de colmos foram submetidos à análise de variância, tendo-se aplicado o teste F, a 5% de probabilidade. Em seguida, realizou-se a análise de regressão para os efeitos significativos. Os coeficientes dos componentes de cada modelo foram testados, tendo-se escolhido os modelos significativos com maior coeficiente de determinação (R^2). Com base nos modelos de regressão, selecionados para a produção agrícola de colmos em função das doses de P aplicadas (kg ha^{-1}), calcularam-se as doses necessárias para atingir 50, 70, 90 e 100% da produtividade máxima agrônômica, em cada solo. Concomitantemente, desenvolveram-se regressões que relacionaram teores de P no solo com os diferentes extratores (mg dm^{-3}), em função das doses de P aplicadas (kg ha^{-1}). Assim, pela substituição das doses de máxima eficiência econômica (MEE, kg ha^{-1}) nessas regressões, obtiveram-se os níveis críticos de P (mg dm^{-3}) para os diferentes extratores.

As regressões descritas foram utilizadas para determinar os intervalos de teores disponíveis de P e para calcular as doses de P em função da produtividade máxima agrônômica (PMA). Assim, os intervalos de teores foram estratificados em cinco classes de fertilidade: muito baixa, correspondente a <50% da PMA; baixa, 50–70% da PMA; média, 70–90% da PMA; alta, 90–100% da PMA; e muito alta, >100%.

Para a recomendação das doses de P de acordo com as classes de fertilidade do solo, utilizou-se o critério da dose de suficiência, que preconiza a elevação do teor do nutriente no solo até os valores de nível crítico (Cantarutti et al., 2007), em dois intervalos de produtividade de colmos: $\geq 90 \text{ Mg ha}^{-1}$ e $< 90 \text{ Mg ha}^{-1}$.

Resultados e Discussão

Para que um extrator químico represente adequadamente a disponibilidade de um nutriente no solo, é fundamental que o teor do elemento extraído correlacione-se significativamente ao seu conteúdo na planta. Assim, os teores de P determinados por Mehlich-1 correlacionaram-se positivamente ao P absorvido pela cana-de-açúcar, em todos os componentes da parte aérea (Tabela 3). Os níveis críticos de P no solo, obtidos quando se utilizou esse extrator, correlacionaram-se negativamente ao teor de argila e positivamente aos valores de P-rem. Esses resultados foram corroborados pela correlação negativa dos níveis críticos com a CMAP (Tabela 4).

A influência da textura do solo e da CMAP sobre a disponibilidade de P, quando se utiliza o extrator Mehlich-1, é bastante conhecida e já foi relatada quanto aos solos de Pernambuco (Bonfim et al., 2004; Broggi et al., 2010a). No entanto, a maioria dos trabalhos sobre o assunto foi realizada em condições controladas, em que as doses, os níveis críticos e as relações solo/planta são expressivamente diferentes das condições de campo. A CMAP do solo fornece uma indicação da quantidade de minerais presentes no solo, que são adsorvidos de P e, também, da afinidade desses minerais pelo elemento. Portanto, a CMAP constitui uma informação valiosa para a interpretação da disponibilidade de P no solo. No entanto, sua determinação é demorada, dispendiosa e demanda elevada competência técnica. Como alternativa, tem-se utilizado o P-rem, que é a CMAP em um único ponto (60 mg L^{-1} de P). O teor de argila também pode ser utilizado para estimar a CMAP do solo, mas, apesar de sua determinação rotineira nos laboratórios, ele apresenta baixa capacidade de predição.

Os teores de P do solo obtidos com a resina de troca aniônica (RTA) também se correlacionaram positivamente ao P acumulado pela cana-de-açúcar, em todos os componentes da parte aérea (Tabela 3). Além disso, para alguns dos componentes, os resultados

obtidos com esse extrator apresentaram a maior significância (Tabela 3). Em contraste com os teores de P obtidos com o Mehlich-1, os níveis obtidos com a RTA não se correlacionaram às características químicas e físicas do solo, exceto com uma baixa significância ($p < 0,10$), observada na correlação com P-rem, porém não confirmada, em razão da ausência de correlação com a CMAP (Tabela 4). Uma das grandes vantagens do método é o fato de não haver necessidade de que sejam conhecidos os teores de argila ou os valores de P-rem, para interpretar os teores de P no solo pela resina.

Tabela 3. Coeficientes de correlação simples entre os conteúdos de fósforo, nos componentes da parte aérea da cana-de-açúcar, e teores de fósforo disponível nos solos, determinados pelos diferentes extratores avaliados.

Componente	Extrator			
	Bray-1	Mehlich-1	Mehlich-3	RTA
Argissolo Amarelo distrocoeso, PAdx				
Ponteiro	0,6859**	0,7296**	0,7625**	0,8741***
Folha verde	0,2544 ^{ns}	0,2523 ^{ns}	0,3166 ^{ns}	0,3178 ^{ns}
Colmo	0,7589**	0,8002**	0,8012**	0,8942***
Folha senescente	0,5172 ^{ns}	0,5532*	0,5762*	0,6731**
Total	0,7255**	0,7673**	0,7882**	0,8896***
Latossolo Amarelo distrófico, LAd				
Ponteiro	0,7542**	0,8437***	0,8406***	0,8425***
Folha verde	0,5743*	0,6711**	0,6676**	0,6775**
Colmo	0,8308**	0,9028***	0,9004***	0,8983***
Folha senescente	0,6944**	0,7608**	0,7579**	0,7648**
Total	0,7831**	0,8641***	0,8613***	0,8623***
Argissolo Amarelo distrófico, PAd				
Ponteiro	0,4893 ^{ns}	0,7422**	0,4542 ^{ns}	0,7985**
Folha verde	0,8705***	0,9112***	0,8386***	0,8712***
Colmo	0,8460***	0,9251***	0,8129**	0,9171***
Folha senescente	0,6790**	0,7731**	0,6389*	0,7960**
Total	0,7312**	0,9024***	0,6940**	0,9253***
Gleissolo Háplico eutrófico, GXve				
Ponteiro	0,4451 ^{ns}	0,4600 ^{ns}	0,4936 ^{ns}	0,5080 ^{ns}
Folha verde	0,7001**	0,7148**	0,7706**	0,7911**
Colmo	0,5405 ^{ns}	0,5345 ^{ns}	0,5493 ^{ns}	0,4578 ^{ns}
Folha senescente	0,5066 ^{ns}	0,5342 ^{ns}	0,6258*	0,7988**
Total	0,5525*	0,5546*	0,5836*	0,5402 ^{ns}
Espodossolo Humilúvico órtico, EKO				
Ponteiro	0,5560*	0,6981**	0,5051 ^{ns}	0,5917*
Folha verde	0,7949**	0,7402**	0,7073**	0,6545*
Colmo	0,6889**	0,8355***	0,6879**	0,7609**
Folha senescente	0,7354**	0,6209*	0,6946**	0,6574*
Total	0,7110**	0,8233**	0,6869**	0,7435**

^{ns}Não significativo. *, ** e ***Significativo a 10, 5 e 1% de probabilidade, respectivamente. RTA, resina de troca aniônica.

Houve menor variação entre os solos quanto à produção relativa de cana-de-açúcar, em consequência dos teores de P no solo, quando o extrator utilizado foi a RTA (Figura 1), mesmo entre solos com características químicas e físicas bastante diferentes (Tabela 1). Portanto, o extrator RTA foi mais estável do que Mehlich-1, Mehlich-3 e Bray-1.

Os teores de P determinados pelos extratores Mehlich-3 e Bray-1 também se correlacionaram positivamente ao P absorvido e acumulado nos componentes da parte aérea (Tabela 3). No entanto, estes são extratores de difícil operacionalização, principalmente o Mehlich-3. A exemplo dos resultados obtidos com a RTA, os níveis críticos de P determinados com o extrator Bray-1 também não se correlacionaram a nenhuma característica química ou física dos solos. Os níveis críticos obtidos com o Mehlich-3 não se correlacionaram à CMAP, mas apresentaram correlação com o P-rem e com os conteúdos de óxidos de Fe amorfo (Feo) e cristalino (Fed).

Os extratores Mehlich-1 e RTA foram selecionados para a avaliação da disponibilidade de P nos solos, em função de seu bom desempenho nas análises de correlação com os teores do nutriente na parte aérea (Figura 1 e Tabela 3), e pelo fato de serem os extratores mais comumente utilizados no país. A partir dos valores disponíveis de P, de acordo com esses extratores e com os resultados das fertilizações fosfatadas, foi possível estabelecer uma Tabela de interpretação de disponibilidade de P para os diferentes solos avaliados (Tabela 5).

Em Minas Gerais, as classes de interpretação para teores obtidos com Mehlich-1 são estabelecidas de

Tabela 4. Coeficientes de correlação simples entre o nível crítico de P no solo, para cana-planta, e características físicas ou químicas dos solos, segundo os diferentes extratores utilizados.

Característica	Nível crítico de P no solo			
	Bray-1	Mehlich-1	Mehlich-3	RTA
Argila	-0,6571 ^{ns}	-0,9400**	-0,6398 ^{ns}	-0,6300 ^{ns}
P-remanescente	0,6758 ^{ns}	0,9214**	0,8176**	0,7328*
CMAP	-0,4922 ^{ns}	-0,8217**	-0,6798 ^{ns}	-0,6560 ^{ns}
Feo	-0,6213 ^{ns}	-0,9636***	-0,8835**	-0,6409 ^{ns}
Fed	-0,5536 ^{ns}	-0,9328**	-0,8848**	-0,6856 ^{ns}

^{ns}Não significativo. *, ** e ***Significativo a 10, 5 e 1% de probabilidade, respectivamente. RTA, resina de troca aniônica; CMAP, capacidade máxima de adsorção de P Feo, Fe amorfo; e Fed, Fe cristalino.

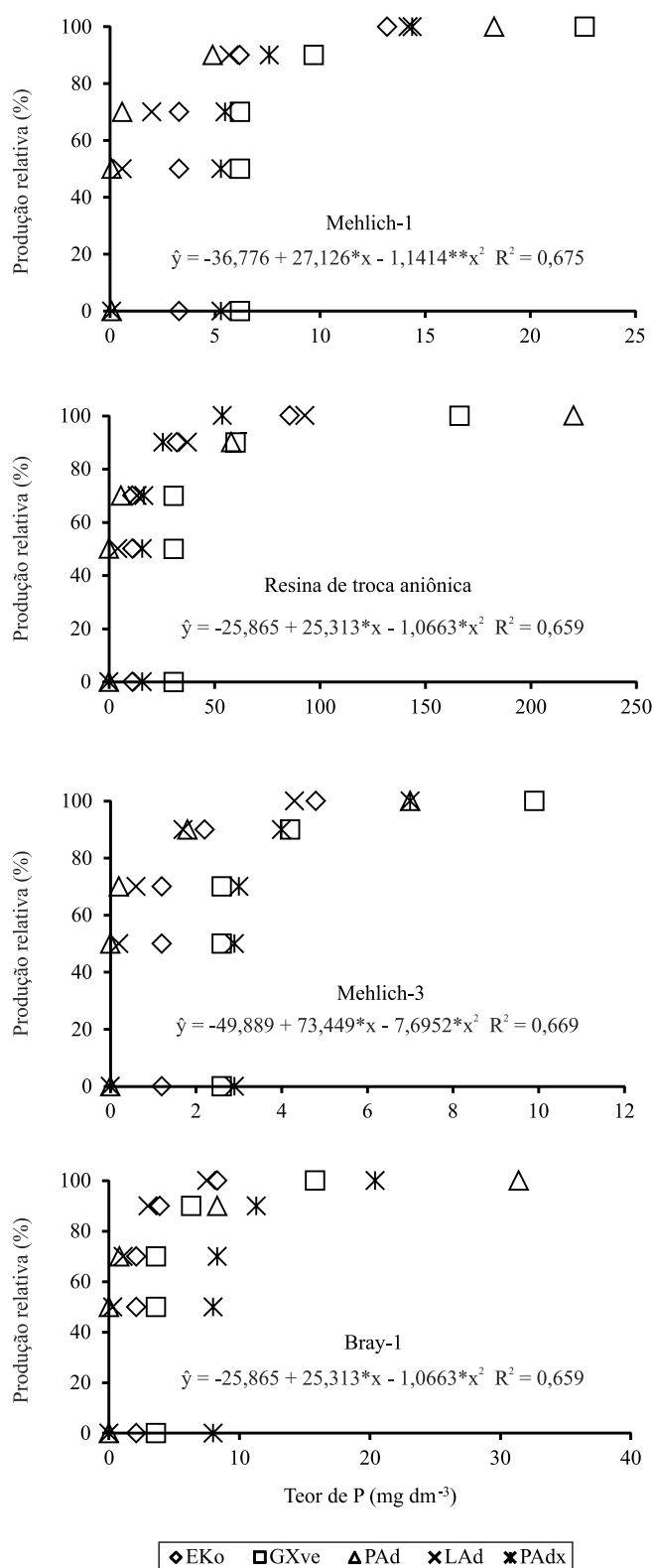


Figura 1. Produção relativa de cana-de-açúcar, em função do teor de fósforo disponível nos solos medido pelos extratores Mehlich-1, resina de troca aniônica, Mehlich-3 e Bray-1.

acordo com o teor de argila ou com o P-rem (Ribeiro et al., 1999). Para a classe muito baixa, os teores de P variam entre $\leq 2,7$ e ≤ 10 mg dm⁻³, para teores de argila entre >600 e ≤ 150 g kg⁻¹, respectivamente. Para a região dos Cerrados, os teores de P considerados muito baixos variam de $<2,0$ a $<6,0$ mg dm⁻³, para aqueles mesmos teores de argila (Sousa et al., 2002). No Rio Grande do Sul e em Santa Catarina, os teores de P na classe muito baixa estão entre ≤ 2 e ≤ 7 mg dm⁻³, para teores de argila >600 e ≤ 200 g kg⁻¹, respectivamente (Manual de adubação e calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, 2004). No presente trabalho, sugerem-se teores de P que variam entre $<3,5$ e $<10,5$ mg dm⁻³, nesta classe de interpretação e com os mesmos teores de argila.

É possível observar, portanto, que os valores de P, na Tabela de interpretação sugerida no presente trabalho, para essa classe de disponibilidade do elemento no solo (Tabela 5), são superiores aos utilizados nos manuais para o Estado de Minas Gerais, para a região dos Cerrados e para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. Esses resultados indicam que os solos de Pernambuco cultivados com cana-de-açúcar, possivelmente, apresentam menor afinidade pelo P (Simões Neto et al., 2009) do que os solos das regiões supracitadas.

Para Minas Gerais, os critérios de avaliação de disponibilidade de P descrevem seis estratos, de acordo com os valores de P-rem (Ribeiro et al., 1999). No Cerrado, no entanto, há somente quatro classes de disponibilidade (Sousa et al., 2002). Conforme sugerido no presente trabalho (Tabela 5), em solos que apresentam P-rem ≤ 12 e entre 35 e 60 mg L⁻¹, os

Tabela 5. Estratificação dos teores de P disponível no solo, determinados pelos extratores Mehlich-1 e resina de troca aniônica em classes de disponibilidade do nutriente no solo, para o cultivo de cana-planta.

Argila (g kg ⁻¹)	P-rem (mg L ⁻¹)	Classe de disponibilidade (mg dm ³)				
		Muito baixa	Baixa	Média	Alta	Muito alta
Mehlich-1						
>600	<12	<3,5	3,5–5,5	5,6–9,5	9,6–12,0	>12,0
350 a 600	12 a 17	<6,5	6,5–9,5	9,6–12,5	12,6–16,0	>16,0
150 a 350	17 a 35	<8,5	8,5–12,5	12,6–15,0	15,1–18,0	>18,0
<150	35 a 60	<10,5	10,5–13,5	13,6–17,0	17,1–20,0	>20,0
Resina de troca aniônica						
-	-	<30	30,0–40,0	41,0–56,0	57,0–65,0	>65,0

teores de P na classe de disponibilidade muito baixa devem variar entre $<3,5$ e $<10,5$ mg dm⁻³ de P. A menor efetividade dos processos de fixação de P nos solos de Pernambuco, comparados aos de Minas Gerais, indica que não há necessidade de uma maior estratificação do P-rem, como em Minas Gerais, ou de teores tão baixos de P disponível, como nos Cerrados.

Quando a disponibilidade de P é avaliada pela RTA, em solos do Cerrado, Raij et al. (1997) e Sousa et al. (2002) descrevem, respectivamente, teores de P ≤ 6 e ≤ 5 mg dm⁻³ de P, para a classe de interpretação muito baixa. No presente trabalho, indicam-se, para a mesma classe de interpretação, teores de P <30 mg dm⁻³, bem acima dos propostos para São Paulo e Minas Gerais. Como a RTA é capaz de acessar todo o P lábil (Gatiboni et al., 2005; Freitas et al., 2013), independentemente dos atributos químicos ou físicos dos solos (Tabela 4), é possível inferir que, nos solos de Pernambuco, esse compartimento é maior ou mais lábil.

Definidas as classes de disponibilidade de P no solo (Tabela 5) e com os resultados obtidos com as fertilizações fosfatadas, recomenda-se a adubação fosfatada para os solos avaliados no presente trabalho de acordo com a Tabela 6. Esta recomendação também leva em conta a produtividade esperada da cana-planta.

Raij et al. (1997), Ribeiro et al. (1999), Sousa et al. (2002), o Manual de adubação e calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina (2004), recomendam, para a classe mais baixa de disponibilidade de P e para produtividade esperada entre 100 e 150 Mg ha⁻¹ de cana (MCH), as doses de P₂O₅ de 180, 150, 100 e 140 kg ha⁻¹, respectivamente. No presente trabalho, recomenda-se a dose de 180 kg ha⁻¹ de P₂O₅, para a mesma classe de disponibilidade e para produtividade acima de 90 Mg ha⁻¹ (Tabela 6).

Tabela 6. Recomendação de fertilização fosfatada (kg ha⁻¹ P₂O₅) para cana-de-açúcar, com base nas classes de disponibilidade de fósforo determinadas pelos extratores Mehlich-1 e resina de troca aniônica, de acordo com diferentes valores de produtividade esperada de colmos.

Produtividade esperada (Mg ha ⁻¹)	Classe de fertilidade para fósforo				
	Muito baixa	Baixa	Média	Alta	Muito alta
>90	180	150	120	90	60
<90	160	130	100	70	40

As recomendações de adubação fosfatada para a cultura da cana-de-açúcar representam um avanço significativo às sugeridas atualmente pelo Manual de recomendações de adubação para o Estado de Pernambuco, pois deixam de constituir recomendações medianas e evoluem para uma recomendação mais criteriosa e estratificada, adequada ao ambiente de cultivo da cana-planta no Estado.

Conclusões

1. O extrator Mehlich-1 e a resina de troca aniônica são capazes de representar adequadamente a disponibilidade de P em solos para o cultivo da cana-de-açúcar na região Nordeste do Brasil.

2. A disponibilidade de P nos solos avaliados pode ser estratificada em cinco classes de fertilidade para diferentes conteúdos de argila: muito baixa, baixa, média, alta e muito alta.

Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio financeiro; às Usinas Cucaú, Pumaty, Salgado e Santa Teresa, pela permissão de uso de área experimental.

Referências

- ALVAREZ V., V.H.; FONSECA, D.M. Definição de doses de fósforo para determinação da capacidade máxima de adsorção de fosfatos e para ensaios em casa de vegetação. **Revista Brasileira da Ciência do Solo**, v.14, p.44-55, 1990.
- ALVAREZ V., V.H.; NOVAIS, R.F. de; DIAS, L.E.; OLIVEIRA, J.A. Caracterização química dos Solos: determinação e uso do fósforo remanescente. **Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, v.25, p.27-32, 2000.
- ALVES, M.E.; LAVORENT, A. Remaining phosphorus and sodium fluoride pH in soils with different clay contents and clay mineralogies. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.39, p.241-246, 2004. DOI: 10.1590/S0100-204X2004000300006.
- BONFIM, E.M.S.; FREIRE, F.J.; SANTOS, M.V.F.; SILVA, T.J.A.; FREIRE, M.B.G.S. dos S. Níveis críticos de fósforo para *Brachiaria brizantha* e suas relações com características físicas e químicas em solos de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.281-288, 2004. DOI: 10.1590/S0100-06832004000200006.
- BORTOLON, L.; GIANELLO, C. Interpretação de resultados analíticos de fósforo pelos extratores Mehlich-1 e Mehlich-3 em solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de**

- Ciência do Solo**, v.32, p.2751-2756, 2008. DOI: 10.1590/S0100-06832008000700019.
- BROGGI, F.; FREIRE, F.J.; FREIRE, M.B.G. dos S.; NASCIMENTO, C.W.A. do; OLIVEIRA, A.C. de. Avaliação da disponibilidade, adsorção e níveis críticos de fósforo em diferentes solos. **Revista Ceres**, v.57, p.247-252, 2010a. DOI: 10.1590/S0034-737X2010000200017.
- BROGGI, F.; OLIVEIRA, A.C. de; FREIRE, F.J.; FREIRE, M.B.G. dos S.; NASCIMENTO, C.W.A. do. Adsorption and chemical extraction of phosphorus as a function of soil incubation. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, p.32-38, 2010b. DOI: 10.1590/S1415-43662010000100005.
- CANTARUTTI, R.B.; BARROS, N.F. de; MARTINEZ, H.E.P.; NOVAIS, R.F. Avaliação da fertilidade do solo e recomendação de fertilizantes. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; BARROS, N.F. de; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p.769-850.
- CERRI, D.G.P.; MAGALHÃES, P.S.G. Correlation of physical and chemical attributes of soil with sugarcane yield. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.47, p.613-620, 2012. DOI: 10.1590/S0100-204X2012000400018.
- DONAGEMA, G.K.; CAMPOS, D.V.B. de; CALDERANO, S.B.; TEIXEIRA, W.G.; VIANA, J.H.M. (Org.). **Manual de métodos de análise do solo**. 2.ed. rev. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 230p. (Embrapa Solos. Documentos, 132).
- FREITAS, I.F. de; NOVAIS, R.F.; VILLANI, E.M. de A.; NOVAIS, S.V. Phosphorus extracted by ion exchange resins and Mehlich-1 from Oxisols (Latosols) treated with different phosphorus rates and sources for varied soil-source contact periods. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.37, p.667-677, 2013. DOI: 10.1590/S0100-06832013000300013.
- GATIBONI, L.C.; KAMINSKI, J.; SANTOS, D.R. dos. Modificações nas formas de fósforo do solo após extrações sucessivas com Mehlich-1, Mehlich-3 e resina trocadora de ânions. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.29, p.363-371, 2005. DOI: 10.1590/S0100-06832005000300006.
- MANUAL de adubação e calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo - Núcleo Regional Sul, 2004. 400p.
- MARINHO, M.L.; ALBUQUERQUE, G.A.C. Calibration of extractable phosphorus in soils for sugarcane in Alagoas, Brazil. In: INTERNATIONAL SOCIETY OF SUGAR CANE TECHNOLOGISTS CONGRESS, 16., 1977, São Paulo. **Proceedings**. São Paulo: Companhia Brasileira de Impressão e Propaganda, 1978. p.1283-1292.
- OLIVEIRA, E.C.A. de; SILVA, G.P. da; OLIVEIRA, R.I. de; CUNHA FILHO, M.; LIRA JUNIOR, M.A.; FREIRE, F.J. Crescimento, produtividade e nível crítico de fósforo para o quiabeiro em relação à adubação fosfatada. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.8, p.589-594, 2013. DOI: 10.5039/agraria.v8i4a3150.
- RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2.ed. rev. atual. Campinas: Instituto Agrônomo; Fundag, 1997. 285p. (IAC. Boletim técnico, 100).
- RECOMENDAÇÕES de adubação para o Estado de Pernambuco. 2.ed. Recife: Instituto Agrônomo de Pernambuco, 2008. 198p.
- RIBEIRO, A.C.; GUIMARAES, P.T.G.; ALVAREZ V., V.H. (Ed.). **Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais**: 5a. aproximação. Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. 359p.
- SANTOS, D.R.; GATIBONI, L.C.; KAMINSKI, J. Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema plantio direto. **Ciência Rural**, v.38, p.576-586, 2008. DOI: 10.1590/S0103-84782008000200049.
- SANTOS, H.G. dos; JACOMINE, P.K.T.; ANJOS, L.H.C. dos; OLIVEIRA, V.A. de; LUMBRERAS, J.F.; COELHO, M.R.; ALMEIDA, J.A. de; CUNHA, T.J.F.; OLIVEIRA, J.B. de. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3.ed. rev. e ampl. Brasília: Embrapa, 2013. 353p.
- SCHLINDWEIN, J.A.; GIANELLO, C. Fósforo disponível determinado por lâmina de resina enterrada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, p.77-84, 2009. DOI: 10.1590/S0100-06832009000100008.
- SCHWERTMANN, U.; TAYLOR, R.M. Iron oxides. In: DIXON, J.B.; WEED, S.B. (Ed.). **Minerals in soil environments**. 2nd ed. Madison: Soil Science Society of America, 1989. p.379-438.
- SILVA, F.C. da (Ed.). **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2.ed. Brasília: Embrapa Informática Tecnológica; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2009. 627p.
- SIMÕES NETO, D.E.; OLIVEIRA, A.C. de; FREIRE, F.J.; FREIRE, M.B.G. dos S.; NASCIMENTO, C.W.A. do; ROCHA, A.T. da. Extração de fósforo em solos cultivados com cana-de-açúcar e suas relações com a capacidade tampão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.13, p.840-848, 2009. DOI: 10.1590/S1415-43662009000700005.
- SIMÕES NETO, D.E.; OLIVEIRA, A.C. de; ROCHA, A.T. da; FREIRE, F.J.; FREIRE, M.B.G. dos S.; NASCIMENTO, C.W.A. do. Níveis críticos de fósforo em solos cultivados com cana-de-açúcar em Pernambuco. **Revista Ceres**, v.58, p.802-810, 2011. DOI: 10.1590/S0034-737X2011000600018.
- SOBRAL, A.F. de; LIRA, L.J. de A. Adubação fosfatada para cana-de-açúcar no Nordeste através da análise química do solo. In: CONGRESSO NACIONAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO, 30., 1989, Recife. **Anais**. Recife: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1989. p.30-34.
- SOUSA, D.M.G. de; LOBATO, E.; REINT, A. Adubação com fósforo. In: SOUSA, D.M.G. de; LOBATO, E. (Ed.). **Cerrado: correção do solo e adubação**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2002. p.147-168.
- SOUZA JÚNIOR, R.F. de; OLIVEIRA, F.H.T. de; SANTOS, H.C.; FREIRE, F.J.; ARRUDA, J.A. de. Frações de fósforo inorgânico do solo e suas correlações com o fósforo

quantificado por extratores e pelo milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, p.159-169, 2012. DOI: 10.1590/S0100-06832012000100017.

WHITTING, L.D.; ALLARDICE, W.R. X-ray diffraction techniques. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Madison: Soil Science Society of America, 1986. p.331-359.

Recebido em 3 de junho de 2014 e aprovado em 4 de dezembro de 2014