

Efeito residual de fontes de fósforo nos atributos químicos do solo, nutrição e produtividade de biomassa da cana-de-açúcar

Gustavo Caione¹, Francisco M. Fernandes² & Anderson Lange³

¹ Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal, Via de Acesso Prof. Paulo Donato Castellane s/n, CEP 14884-900, Jaboticabal-SP, Brasil. E-mail: gustavocaione@agronomo.eng.br

² Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Departamento de Fitossanidade Engenharia Rural e Solos, Av. Brasil, 56, Centro, CEP 15385-000, Ilha Solteira-SP, Brasil. Caixa Postal 31. E-mail: maximino@agr.feis.unesp.br

³ Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de Ciências Agrárias e Ambientais, Av. Alexandre Ferronato, 1200, Distrito Industrial, CEP 78550-000, Sinop-MT, Brasil. E-mail: paranalange@hotmail.com

RESUMO

Em regiões de clima tropical o efeito residual da fonte de adubo fosfatado é de importância crucial. Objetivou-se avaliar os efeitos da aplicação de fontes de P nos atributos químicos do solo, nutrição e produtividade da cana-de-açúcar durante a cana planta e a primeira e segunda soqueiras. Foram aplicadas, no sulco de plantio, as fontes de P, superfosfato triplo, fosfato de Arad, farinha de ossos (100 kg ha^{-1} de P_2O_5 total) e um controle, sem P, nas variedades de cana-de-açúcar IAC86-2480 e SP79-1011. Utilizou-se o delineamento de blocos casualizados em esquema fatorial 4×2 , com quatro repetições. O trabalho foi realizado no município de Alta Floresta-MT, Brasil, em Latossolo Vermelho Amarelo distrófico. Após cada corte foi avaliado, no solo, o teor de P, Ca e pH. Na planta avaliaram-se a produtividade de fitomassa verde, de matéria seca da parte aérea, a concentração de P na biomassa coletada, a exportação de P e a eficiência agrônômica das fontes de P. A farinha de ossos apresentou maior eficiência agrônômica, proporcionou maior acúmulo e exportação de P pela cultura, maior teor de Ca e P disponível no solo e aumento do pH. O fosfato natural reativo de Arad aumentou sua eficiência agrônômica entre os ciclos de cultivo.

Palavras-chave: adubação fosfatada, eficiência agrônômica, farinha de ossos, *Saccharum* spp.

Residual effect of phosphorus sources in soil chemical properties, nutrition and biomass productivity of sugarcane

ABSTRACT

In tropical regions, the residual effect of phosphate fertilizer source is of crucial importance. This study aimed to evaluate the effects of application of P sources in chemical properties of soil, nutrition and productivity of sugarcane plant and during the first and second ratoon. The sources of P applied in furrows at planting were, triple superphosphate, Arad phosphate, bone meal (100 kg ha^{-1} P_2O_5 total) and a control without P, the varieties of sugarcane studied were IAC86-2480 and SP79-1011. A randomized block design in a 4×2 factorial was used, with four replications. The study was conducted in the municipality of Alta Floresta-MT, Brazil, in Typic Hapludox. After each cutting, in soil P content, pH and Ca were evaluated. In the plant, the production of green and dry matter of shoots, the concentration of P in the biomass harvested, the export of P and agronomic efficiency of the sources of P were determined. The bone meal had a higher agronomic efficiency resulted in greater accumulation and export of P by crop, higher content of available Ca and P and increase soil pH. The Arad reactive phosphate increased its agronomic efficiency between crop cycles.

Key words: phosphorus fertilization, agronomic efficiency, bone meal, *Saccharum* spp.

Introdução

Dentre os nutrientes essenciais às plantas, o fósforo (P) exerce função relevante no metabolismo, apresentando grande importância no armazenamento e na transferência de energia e ainda atua como componente dos ácidos nucleicos, fitina e fosfolipídios (Epstein & Bloom, 2006), constituindo-se elemento-chave para o desenvolvimento inicial, produtividade e longevidade da cultura e, conforme observado por Santos et al. (2011) pode, também, aumentar a produção de sólidos solúveis; no entanto, a eficiência da adubação fosfatada é baixa sobretudo em solos tropicais altamente intemperizados.

Nos solos tropicais predominam argilas 1:1 e óxi-hidróxidos de ferro e de alumínio; esses minerais possuem elevada capacidade de adsorção de P, característica esta um dos fatores que controlam a disponibilidade deste nutriente. A adsorção de fósforo nos solos pode ser afetada pela quantidade e mineralogia das argilas, teor de matéria orgânica, cálcio, ferro trivalente, alumínio e pH (Sanchez & Uehara, 1980).

Portanto, para suprir a demanda de P pelas plantas torna-se conveniente a aplicação do nutriente via fertilizante. Com a adição de fertilizantes fosfatados há acúmulo de P em formas inorgânicas e orgânicas com diferentes graus de energia de ligação, embora o acúmulo seja mais pronunciado nas formas inorgânicas (Daroub et al., 2000). A redistribuição de P em diversas formas é dependente da fonte utilizada.

Após a aplicação ao solo de um fertilizante fosfatado ocorre uma sequência de eventos físico-químicos que transformam esse fosfato em substância fosfatada complexa, as quais passam governar a disponibilidade desse nutriente no solo. Se o P se encontra em solução ou fracamente adsorvido, considera-se que esta é a forma lábil, pois está disponível. Entretanto, quando a adsorção ocorre por meio de ligações mais fortes este grau de interação dificulta a desorção do P para solução do solo, caracterizando as formas não lábeis.

A aplicação de um material orgânico é um fator que influencia a disponibilidade de P. De acordo com Hue et al. (1994) a adição de M.O. inicialmente eleva o pH resultando na redução do Al trocável e, conseqüentemente, na sua atividade na solução do solo. Além disto, o aumento na densidade de cargas negativas na superfície dos óxidos de Fe e Al diminui a adsorção de P (Haynes & Mokolobate, 2001). Com o passar do tempo os ácidos orgânicos resultantes da decomposição da M.O., podem diminuir o pH, tendo como benefício a solubilização dos fosfatos naturais elevando, então, sua eficiência agrônômica.

Se forem adicionados fosfatos solúveis em água a reação no solo será rápida e os novos produtos formados manterão uma solução saturada em P, em torno da região de dissolução do grânulo. Com o resultado o pH do sítio onde ocorreu a reação será menor que o inicial. Após a aplicação de um fertilizante de baixa solubilidade haverá um tipo de reação similar caso em que a solução será mais diluída e o potencial osmótico será menor, ambos ditados pela solubilidade do produto utilizado e o pH do sítio da reação praticamente não se alterará (Sample et al., 1980).

Espécies de plantas com elevada demanda por Ca e com capacidade de complexar este nutriente pela exsudação de

ácidos orgânicos, também podem influenciar a eficiência agrônômica dos fosfatos naturais e só então elevar a eficiência de absorção de P. Além disto, esses ácidos orgânicos podem atuar na dissolução da apatita promovendo a liberação de P (Marwaha, 1989).

Visto que as reservas de P são finitas e devido à elevada demanda pelo nutriente na agricultura, faz-se necessário o estudo de fontes alternativas do nutriente; neste sentido, a farinha de ossos surge como fonte alternativa de P que merece maiores estudos. No entanto, trabalhos avaliando a utilização deste resíduo de indústria frigorífica na nutrição de plantas são escassos, podendo-se destacar o trabalho de Oliveira et al. (2012) com o qual os autores verificaram a eficiência deste produto no estabelecimento e na produtividade de pastagens.

Com este contexto, o uso da farinha de ossos como fonte alternativa de P tem despertado interesse na região norte mato-grossense, principalmente em função do baixo custo por unidade de P, em relação às demais fontes. Atualmente, as indústrias frigoríficas localizadas no município de Alta Floresta abatem diariamente 1.000 bovinos, em média, gerando uma quantidade significativa de farinha de ossos. Contudo, a demanda pelo produto é baixa e assim tem-se, disponível, um produto orgânico que pode apresentar boa eficiência para fins de adubação já que apresenta teores significativos de P e Ca, além de outros elementos em menores concentrações (Na, Fe, Zn, S e Si) (Avelar et al., 2009).

Fundamenta-se, daí, a elaboração deste trabalho na hipótese de que, em longo prazo, a fonte orgânica de P (farinha de ossos) e o fosfato natural de rocha tenham melhor eficiência no fornecimento de P para as plantas em comparação com uma fonte mineral solúvel no cultivo da cana-de-açúcar, que é a principal forrageira utilizada na estação seca do ano, na região de estudo. Com base no exposto objetivou-se avaliar o efeito da aplicação de fontes de P nos atributos químicos do solo, nutrição e na produtividade de duas variedades de cana-de-açúcar, durante os primeiros ciclos (cana planta), segundo ciclo (1ª soca) e terceiro ciclo (2ª soca).

Material e Métodos

O experimento foi realizado em campo localizado no município de Alta Floresta-MT, situado nas coordenadas geográficas de 56° 07' 47" longitude W e 9° 59' 03" latitude S, com altitude média de 300 m. O clima predominante é do tipo AWI, clima tropical chuvoso com nítida estação seca, de acordo com a classificação de Köppen. Na Figura 1 são apresentados os dados de precipitação pluvial obtidos durante o período de experimentação observando-se pluviosidade total de 2153 mm na cana planta, 2520 mm na primeira soqueira e 2244 mm na segunda soqueira.

O solo da área experimental é classificado como Latossolo Vermelho Amarelo distrófico (Embrapa, 2006), o qual foi explorado com pastagem, durante 15 anos. As análises granulométrica e química do solo foram realizadas antes da instalação do experimento e os resultados observados na camada de 0,0 – 0,2 m de profundidade foram: argila= 393 g kg⁻¹; silte = 69 g kg⁻¹ e areia = 538 g kg⁻¹; pH (CaCl₂) = 4,4; pH (H₂O) = 5,3; M.O. = 14 g dm⁻³; P_{-Mehlich 1} = 0,2 mg dm⁻³; K⁺

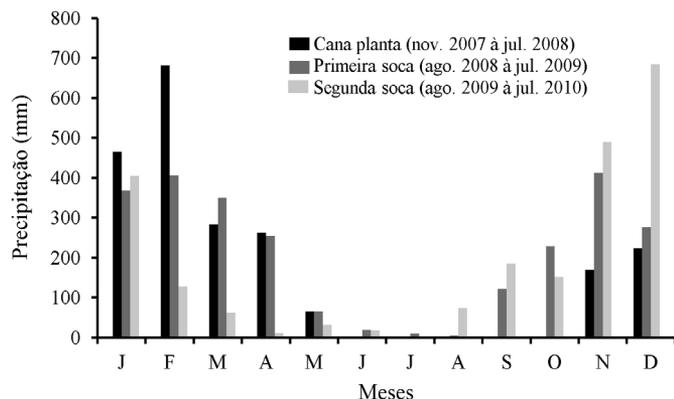


Figura 1. Precipitação pluviométrica durante o período de condução do experimento. Alta Floresta-MT (novembro de 2007 a julho de 2010)

= 1,0 mmol_c dm⁻³; Ca²⁺ = 6,3 mmol_c dm⁻³; Mg²⁺ = 1,3 mmol_c dm⁻³, (H+Al) = 33,3 mmol_c dm⁻³, CTC = 44 mmol_c dm⁻³ e V% = 23,8. Na camada de 0,2 – 0,4 m de profundidade; os valores da análise química foram: pH (CaCl₂) = 4,3; pH (H₂O) = 5,2; M.O. = 8 g dm⁻³; P_{-Mehlich 1} = 0,2 mg dm⁻³; K⁺ = 0,4 mmol_c dm⁻³; Ca²⁺ = 3,1 mmol_c dm⁻³; Mg²⁺ = 1,9 mmol_c dm⁻³, (H+Al) = 28,3 mmol_c dm⁻³, CTC = 34 mmol_c dm⁻³ e V% = 16.

O delineamento experimental foi o de blocos ao acaso (DBC) em arranjo fatorial 4 x 2, constituído de três fontes de P e um tratamento controle (sem P no sulco de plantio) além de duas variedades de cana-de-açúcar com quatro repetições, totalizando 32 unidades experimentais. As parcelas foram constituídas por seis linhas de cana com 5 m de comprimento espaçadas 1,2 m. Consideraram-se área útil de cada parcela as quatro linhas centrais deixando-se um metro de bordadura em cada extremidade.

As fontes de P utilizadas foram: superfosfato triplo (46% de P₂O₅ total e 42,5% solúvel em ácido cítrico a 2%); fosfato natural reativo de Arad (33% de P₂O₅ total e 10,4% solúvel em ácido cítrico a 2%); farinha de ossos (12% de P₂O₅ total e 9,6% solúvel em ácido cítrico a 2%) todas na dose de 100 kg ha⁻¹ de P₂O₅ total, aplicados no fundo do sulco de plantio e um controle (sem adubação fosfatada no sulco de plantio). De acordo com Avelar et al. (2009), a concentração de Ca da farinha de ossos é de 36,7% e para o superfosfato triplo a concentração é de 15%. Com o fosfato de Arad a concentração média de Ca é de 37% (Palharim, 2007). As variedades de cana-de-açúcar plantadas foram a IAC86-2480 e SP79-1011. Optou-se por utilizar essas variedades devido à disponibilidade de mudas e por serem as mais plantadas pelos produtores da Região.

Visando à correção da acidez do solo foram aplicados 2,35 Mg ha⁻¹ de calcário (PRNT = 100%; CaO = 30% e MgO = 20%) a lanço em área total objetivando-se elevar a saturação por bases (V%) para 50, conforme indicações de Sousa & Lobato (2004) (dose calculada para as duas camadas de solo avaliadas). Visto que o nível de P no solo se encontrava muito baixo, efetuou-se a adubação fosfatada corretiva (Sousa & Lobato, 2004), aplicando-se 100 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e se utilizando o fosfato natural reativo de Arad, distribuído na superfície em área total. Após a distribuição do calcário e do fosfato foram realizadas duas arações (incorporação à aproximadamente 0,40 m) e, após 32 dias, uma gradagem, para nivelamento do terreno e posterior plantio da cana-de-açúcar.

O sistema de plantio adotado foi o de cana de ano, plantada no dia 14 de novembro de 2007. Para isto, foram abertos sulcos na profundidade de aproximadamente 0,30 m; em seguida, foram realizadas a adubação no sulco de plantio com as respectivas fontes de P e a adubação potássica, na forma de cloreto de potássio (KCl) aplicado em todas as parcelas, na dose de 80 kg ha⁻¹ de K₂O. Na distribuição das mudas, utilizou-se a densidade média de 15 gemas por metro de sulco, por meio da distribuição de colmos “pé-com-ponta”; em seguida, efetuou-se o corte manual dos colmos, em toletes de 3 gemas e se efetuou o controle de pragas com inseticida à base de Fipronil na dose de 2,8 g 100 m de sulco⁻¹, pulverizando-se as mudas dentro do sulco; posteriormente os sulcos foram cobertos com uma camada de solo (aproximadamente 8 cm) com auxílio de enxada.

A adubação em cobertura da cana planta foi realizada aos 60 dias após o plantio (DAP), quando as plantas apresentavam aproximadamente 0,8 m de altura. Foram aplicados 30 kg ha⁻¹ de N (ureia) e 40 kg ha⁻¹ de K₂O (KCl) em todas as parcelas, ao lado da linha de plantio, de acordo com a recomendação de Sousa & Lobato (2004). Para o controle de plantas daninhas foram aplicados herbicida à base de Dimethylammonium (2,4-dichlorophenoxy) acetate, na dose de 1,5 L ha⁻¹, em jato dirigido e capina para plantas não controladas, em todos os tratamentos e nos três ciclos da cultura. A adubação em cobertura da cana soca (segundo e terceiro ciclos) foi realizada de forma manual, quando as plantas se encontravam com aproximadamente 0,6 m de altura, aplicando-se 120 kg ha⁻¹ de K₂O (KCl) e 60 kg ha⁻¹ de N (sulfato de amônio), ao lado da linha de plantio, segundo a recomendação de Sousa & Lobato (2004).

As avaliações e a colheita da cana-de-açúcar foram realizadas aos 240 DAP para a cana planta, aos 390 dias após o corte (DAC) para a primeira soca e aos 360 DAC para a segunda soca. Como na região de estudo a principal finalidade da cana-de-açúcar é a alimentação animal, optou-se por avaliar a produtividade de fitomassa (colmos + folhas) ao invés de determinar a produtividade de colmos, como é comumente verificado nos trabalhos, cuja finalidade da cultura se refere à indústria sucroalcooleira.

A determinação da produtividade de fitomassa verde (MV) foi baseada na metodologia descrita por Gheller et al. (1999), em que se contaram os colmos existentes em duas linhas centrais de cada parcela; em seguida, 10 colmos + folhas corridos foram cortados em um ponto de amostragem determinado ao acaso, em três linhas da área útil, totalizando 30 colmos + folhas por parcela, para então se proceder à pesagem e à determinação da produtividade de fitomassa sendo que, a partir do número de colmos por metro e peso de 30 plantas, calculou-se a produtividade por parcela e em seguida se estimou a produtividade por hectare. A partir dessas 30 plantas, 20 amostras coletadas ao acaso foram retiradas para determinação da produtividade de matéria seca (MS), para o que foram trituradas em campo e retirada uma amostra, pesada e colocada em estufa de ventilação forçada a 60 °C, até se obter a massa constante; posteriormente a MS foi pesada novamente e quantificada. A concentração de P na MS dos colmos + folhas foi mensurada no material moído, o qual foi analisado no Laboratório de Nutrição Mineral de Plantas da UNESP de

Ilha Solteira, seguindo a metodologia descrita por Malavolta et al. (1997). Com base na concentração de P na MS e na produtividade de MS, estimou-se a exportação de P pela cultura da cana-de-açúcar, em função das fontes de P utilizadas.

Efetuiu-se uma amostragem do solo após o corte da primeira soca e outra após o corte da segunda soca. A amostragem de solo realizada no final do ciclo seria com o intuito de entender as alterações na disponibilidade de P no solo entre um ciclo completo e outro; para isto foram retiradas duas amostras simples por linha de cana-de-açúcar, em três linhas de plantio de cada parcela, na profundidade de 0,0 - 0,20 m, somando-se seis amostras simples para formar uma amostra composta. Optou-se por amostrar o solo na linha de plantio da cultura para refletir melhor o efeito da adubação fosfatada realizada neste local. As análises foram realizadas no Laboratório de Fertilidade do Solo da UNESP de Ilha Solteira, seguindo-se a metodologia do IAC (Rajj et al., 2001), sendo analisados o P_{-resina}, pH e Ca.

Também se calculou a eficiência agrônômica das fontes de P (fosfato de Arad e farinha de ossos), em relação à produtividade de fitomassa (MV) pelo índice de eficiência agrônômica, conforme sugerido por Novais & Smyth (1999) tomando-se o superfosfato triplo como 100% a partir da fórmula: IEA = (Prod. fonte testada) - (Prod. controle) · 100 / (Prod. superfosfato triplo) - (Prod. controle).

Os resultados obtidos foram submetidos à análise de variância pelo teste F e comparação de médias, pelo teste de Tukey (p<0,05) para os efeitos significativos utilizando-se o programa estatístico SISVAR® (Ferreira, 2003).

Resultados e Discussão

As fontes de P exerceram efeito significativo sobre o pH, Ca²⁺ e P-disponível no solo (Tabela 1). As variedades não promoveram alterações significativas nesses atributos.

Avaliando a disponibilidade de P no solo fica evidente a superioridade da fonte farinha de ossos em relação às demais (Tabela 1). O fosfato natural reativo de Arad apresentou teores mais constantes do nutriente em ambos os ciclos avaliados porém abaixo dos teores encontrados com o uso da farinha de ossos. O superfosfato triplo apresentou menores teores sendo

que a disponibilidade de P no solo com o uso desta fonte, não diferiu do tratamento controle.

O resultado referente ao superfosfato triplo se assemelha ao obtido por Rossetto et al. (2002) que, avaliando a disponibilidade de P no solo cultivado com cana-de-açúcar verificaram, aos quatro meses após plantio, que os teores de P disponíveis no solo se encontravam ao redor de 60 mg dm⁻³ no tratamento com superfosfato triplo no fundo do sulco e dois anos após a aplicação, o teor no solo já estava próximo ao tratamento que não recebeu P. Este fato comprova as características do fertilizante visto que possui elevada solubilidade em água, disponibilizando P no solo de forma rápida. Santos et al. (2009) avaliando o teor de P disponível no solo (sulco de plantio) aos oito meses após o plantio, com o uso de diferentes fonte de P, não verificaram diferenças entre as fontes estudadas, porém, mesmo sem atingir o nível de significância, os autores observaram que os teores variaram de 52,5 mg dm⁻³ (fórmula 06-26-24) a 118,5 mg dm⁻³ no composto orgânico (torta de filtro, bagaço e cinzas de caldeira). Atualmente, os trabalhos com farinha de ossos são escassos talvez devido à indisponibilidade do produto em algumas regiões, em cujo contexto se destaca o trabalho de Oliveira et al. (2012), em que os autores estudaram os efeitos de fontes de P (superfosfato simples, fosfato de Arad e farinha de ossos) no estabelecimento e na produtividade de forrageiras (*Brachiaria brizatha* cv. Piatã e *Panicum maximum* cv. Mombaça) e verificaram melhores resultados com a utilização do superfosfato simples e da farinha de ossos; as duas fontes resultaram em maior teor e acúmulo de P e maior produtividade de forragem.

Os maiores teores de P encontrados com o uso da farinha de ossos, principalmente na primeira soqueira, podem ser atribuídos à capacidade de elevação do pH após a aplicação de um material orgânico (Hue et al., 1994) resultando na redução do Al trocável e, conseqüentemente, sua atividade na solução do solo. Além de que o aumento na densidade de cargas negativas na superfície dos óxidos de Fe e Al diminui a adsorção de P (Haynes & Mokolobate, 2001). Com o passar do tempo os ácidos orgânicos resultantes da decomposição da M.O., podem diminuir o pH e, assim, a eficiência desta fonte de P tende a diminuir, conforme observado entre a primeira e segunda soqueiras da cana-de-açúcar. Ressalta-se também

Tabela 1. Fósforo (P_{-resina}), pH_{CaCl2} e cálcio (Ca) no solo após o corte das primeira e segunda soqueiras das variedades de cana-de-açúcar, em função do efeito residual de fontes de fósforo (100 kg ha⁻¹ de P₂O₅) aplicadas no sulco de plantio. Alta Floresta, MT, 2009 e 2010

Fontes de P	1ª Soca			2ª Soca		
	P _{-resina} mg dm ³	pH _{CaCl2}	Ca mmol _c dm ³	P _{-resina} mg dm ³	pH _{CaCl2}	Ca mmol _c dm ³
Controle	4,7 c	4,7 b	8,1 c	4,0 c	4,6 b	7,7 b
Farinha de ossos	110,2 a	5,4 a	24,2 a	48,4 a	4,9 a	13,7 a
Fosfato de Arad	43,9 b	4,9 ab	15,9 b	29,5 b	4,7 ab	12,4 a
Superfosfato triplo	26,7 bc	4,9 ab	9,5 bc	9,8 c	4,6 b	9,4 ab
Variedades						
IAC86-2480	41,7	4,8	13,2	26,8	4,6	10,9
SP79-1011	51,1	5,1	15,6	19,1	4,7	10,7
Valor de F						
Fonte (P)	24,76**	3,27*	17,54**	20,21**	4,66*	5,55**
Variedade (V)	1,06 ^{ns}	1,47 ^{ns}	1,82 ^{ns}	2,99 ^{ns}	3,31 ^{ns}	0,03 ^{ns}
P x V	2,58 ^{ns}	1,85 ^{ns}	0,68 ^{ns}	0,72 ^{ns}	0,34 ^{ns}	1,79 ^{ns}
CV (%)	26,24 ⁽¹⁾	9,68	17,51 ⁽¹⁾	26,04 ⁽¹⁾	3,73	15,56 ⁽¹⁾

Médias seguidas de letras distintas nas colunas diferem estatisticamente entre si, a nível de 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey. **: *; ns: significativo (P < 0,01), (P < 0,05) e não significativo (P > 0,05), respectivamente

⁽¹⁾ CV% transformado para Raiz quadrada (x)

a importância do aumento da atividade microbiana do solo quando se aplica um produto rico em matéria orgânica.

Em relação ao pH (CaCl_2) do solo (Tabela 1) observa-se que a farinha de ossos mostrou possuir característica de correção de acidez pois, ao final dos segundo e terceiro ciclos, foram encontrados valores superiores para este atributo ao se utilizar a farinha de ossos. Este efeito se deve ao fato da sua composição química já que Malavolta (1981) descreve que a farinha de ossos é composta, sobretudo, por um grupo carbonato e uma matriz orgânica contendo fosfato tricálcico ou composto hidratado semelhante, o qual ainda possui Na e Mg; assim, o aumento no teor de P disponível é atribuído à elevação do pH, conforme demonstrado por Camargo et al. (2010) de vez que ocorre precipitação do Al e Fe da solução e redução da adsorção de ions fosfatos. O teor de Ca no solo (Tabela 1) também foi influenciado pelas fontes de P em que os tratamentos com farinha de ossos e o fosfato de Arad proporcionaram quantidades superiores do nutriente visto que essas fontes apresentam teor elevado deste elemento em sua composição (Avelar et al., 2009; Palharim, 2007).

De acordo com os estudos, os mecanismos envolvidos na redução da adsorção de P e, conseqüentemente, no aumento do P disponível, têm sido atribuídos à combinação de aumento do pH (Hue et al., 1994), com diminuição do Al trocável e também com a quantidade de P mineralizável que é liberada pelas fontes de matéria orgânica; por meio da adsorção competitiva entre os ácidos orgânicos e o P (Erich et al., 2002) e a complexação de metais e as reações de dissolução (afetando óxidos de Fe e de Al) podendo, potencialmente, reduzir o número de sítios de adsorção liberando P para solução (Haynes & Mokolobate, 2001).

Em referência à concentração de P na planta, houve efeito significativo para as fontes de P nos primeiro e terceiro ciclos (Tabela 2) observando-se, na farinha de ossos, as maiores concentrações. Este resultado se correlaciona, portanto, com a maior disponibilidade de P no solo com o uso da farinha de ossos. O tratamento com fosfato de Arad apresentou resultados inferiores semelhantes aos resultados do tratamento controle. O superfosfato triplo apresentou melhores resultados na cana planta, porém, no terceiro ciclo a concentração de P na MS das plantas não diferiu do controle.

Santos et al. (2009) verificaram, avaliando fontes de P no cultivo da cana planta, maior concentração do nutriente na folha utilizando o superfosfato triplo, sendo superior ao composto (mistura de torta de filtro, bagaço e cinzas). Os resultados não se correlacionaram com os teores no solo, devido, sobretudo, à época de avaliação. Para os teores no solo foram avaliados aos 8 meses após o plantio enquanto a análise foliar se procedeu aos 4 meses.

Em relação às variedades, a maior concentração de P na parte aérea foi verificada na IAC86-2480 durante os três ciclos (Tabela 2). Observa-se também que o teor do nutriente foi decrescente do primeiro ao terceiro ciclo, o que pode ser explicado pelo fato de que a maior disponibilidade de P no solo ocorre no primeiro ano após sua aplicação.

A exportação de P pela parte aérea da cana-de-açúcar foi influenciada pelas fontes de P (Tabela 2) sendo que, com a utilização da farinha de ossos, ocorreu maior exportação durante os três ciclos. Desta forma, no total de três ciclos a superioridade de exportação de P pela cultura com o uso da farinha de ossos, superfosfato triplo e fosfato de Arad, foi de 40,9; 24,7 e 17,2 kg ha^{-1} de P, respectivamente, em relação ao controle.

Lopes (1989) descreve que a remoção de P pela cana-de-açúcar é de 15,91 kg ha^{-1} de P para uma produção de 134 Mg de MV, ou seja, 0,12 kg Mg^{-1} de P; analisando os resultados do presente trabalho (média dos três ciclos) referentes ao teor de P na MS das plantas (Tabela 2) e a produtividade de MV (Tabela 3), observam-se valores superiores aos descritos anteriormente sendo que com a utilização da farinha de ossos os valores foram de 0,19 kg Mg^{-1} de P; para o fosfato de Arad foi de 0,13 kg Mg^{-1} de P e para o superfosfato triplo 0,15 kg Mg^{-1} de P.

Com relação às variedades, a IAC86-2480 exportou maior quantidade de P sendo 25,9 kg ha^{-1} de P a mais que a variedade SP79-1011, no total de três ciclos. De acordo com Oliveira et al. (2010) a extração de P pela variedade SP79-1011 sob irrigação foi de 25 kg ha^{-1} de P para produzir 155 Mg de colmos, ou seja, 0,16 kg de P para cada Mg de colmo, resultados que se assemelham às médias obtidas no presente estudo.

A produtividade de fitomassa (MV) e a matéria seca (MS) da cana-de-açúcar foram influenciadas significativamente pela adubação fosfatada, mas apenas para a cana planta, em

Tabela 2. Concentração de fósforo (P) na matéria seca da parte aérea das plantas e exportação de fósforo (EP) de variedades de cana-de-açúcar (cana planta, primeira e segunda soqueiras) em função da aplicação de fontes de fósforo (100 kg ha^{-1} de P_2O_5) no sulco de plantio. Alta Floresta, MT, 2008, 2009 e 2010

Fontes de P	Cana planta		1ª Soca		2ª Soca	
	P	EP	P	EP	P	EP
	(g kg^{-1})	(kg ha^{-1})	(g kg^{-1})	(kg ha^{-1})	(g kg^{-1})	(kg ha^{-1})
Controle	0,39 c	10,5 c	0,40	8,4 b	0,27 b	7,6 c
Farinha de ossos	0,91 a	35,8 a	0,56	16,4 a	0,45 a	15,2 a
Fosfato de Arad	0,47 c	16,2 c	0,54	14,4 ab	0,37 ab	13,1 ab
Superfosfato triplo	0,70 b	26,3 b	0,55	14,6 ab	0,31 b	10,3 bc
Variedades						
IAC86-2480	0,67 a	27,4 a	0,61 a	19,7 a	0,41 a	13,3 a
SP79-1011	0,57 b	16,1 b	0,42 b	8,2 b	0,31 b	10,2 b
Valor de F						
Fonte (P)	35,95**	19,09**	2,67 ^{ns}	3,28*	7,57**	9,75**
Variedade (V)	6,79*	22,99**	20,74**	35,88**	13,58**	9,32**
P x V	2,82 ^{ns}	1,16 ^{ns}	1,23 ^{ns}	1,28 ^{ns}	1,69 ^{ns}	2,46 ^{ns}
CV (%)	15,48	24,56	23,34	29,81	21,55	24,31

Médias seguidas de letras distintas nas colunas diferem estatisticamente entre si a nível de 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey. **, *; ns: significativo ($P < 0,01$), ($P < 0,05$) e não significativo ($P > 0,05$), respectivamente

Tabela 3. Produtividade de fitomassa (MV) e matéria seca (MS) de variedades de cana-de-açúcar (cana planta, primeira e segunda soqueiras) e produtividade total de fitomassa em função da aplicação de fontes de fósforo (100 kg ha^{-1} de P_2O_5) no sulco de plantio. Alta Floresta, MT, 2008, 2009 e 2010

Fontes de P	Cana planta		1ª Soca		2ª Soca		Total
	MV	MS	MV	MS	MV	MS	MV
	(Mg ha ⁻¹)						
Controle	106,2 b	26,9 b	78,0	21,1	95,3	28,0	279,5 b
Farinha de ossos	149,1 a	39,3 a	98,9	29,1	104,2	33,8	352,2 a
Fosfato de Arad	134,4 a	34,6 ab	93,8	26,7	112,8	35,3	341,0 a
Superfosfato triplo	142,4 a	37,5 a	94,9	26,6	103,3	33,2	340,6 a
Variedades							
IAC86-2480	160,3 a	40,9 a	117,9 a	32,3 a	106,1	32,4	384,3 b
SP79-1011	105,7 b	28,2 b	64,9 b	19,6 b	101,7	32,8	272,3 a
	Valor de F						
Fonte (P)	8,01**	6,99**	1,36 ns	1,72 ns	1,83 ns	2,48 ns	5,5 **
Variedade (V)	66,95**	37,56**	45,31**	27,44**	0,71 ns	0,04 ns	63,3 **
P x V	1,09 ns	0,19 ns	0,32 ns	0,32 ns	0,97 ns	0,67 ns	0,17 ns
CV (%)	14,17	16,97	24,38	26,39	14,41	17,65	21,01

Médias seguidas de letras distintas nas colunas diferem estatisticamente entre si a nível de 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey. **, *; ns: significativo ($P < 0,01$), ($P < 0,05$) e não significativo ($P > 0,05$), respectivamente

que a aplicação de P no sulco de plantio resultou em ganho de produtividade em relação à ausência de sua aplicação (Tabela 3). Ao se comparar os tratamentos que receberam 100 kg ha^{-1} de P_2O_5 no sulco de plantio, não se verificou diferença significativa para as fontes utilizadas. Em relação à produtividade do controle a farinha de ossos, o superfosfato triplo e o fosfato de Arad, proporcionaram aumentos de 40%, 34% e 27% de MV e 46%, 39% e 28% de MS, respectivamente, nesta primeira colheita.

Korndörfer & Melo (2009) verificaram, estudando fontes de P, fluida ou sólida (superfosfato triplo, superfosfato simples, ácido fosfórico e a mistura de ácido fosfórico + fosfato natural) na dose de 100 kg ha^{-1} de P_2O_5 , com a variedade SP71-1406, não haver diferença significativa entre as fontes no rendimento agrícola da cana planta, primeira e segunda socas da cana. Este resultado se assemelha ao obtido no presente trabalho.

Avaliando o efeito do P aplicado no sulco de plantio sobre a produtividade de MV e MS das variedades de cana-de-açúcar nos segundo e terceiro ciclos, não se verificou efeito residual das fontes utilizadas (Tabela 3); no entanto, observou-se elevado ganho de produtividade em função da aplicação de 100 kg ha^{-1} de P_2O_5 no sulco de plantio, em relação à ausência de sua aplicação. Utilizando como fonte de P a farinha de ossos constatou-se um incremento de $72,7 \text{ Mg ha}^{-1}$ de fitomassa para os três cortes totalizando ganho percentual de 26%, em relação ao controle. Com o uso do fosfato de Arad e do superfosfato triplo, este aumento foi de 61,5 e 61,1 Mg ha^{-1} de fitomassa, respectivamente, perfazendo o ganho médio de 22%; desta forma, as três fontes de P proporcionam respostas semelhantes em produtividade garantindo incremento considerável em relação à ausência da aplicação de P no sulco de plantio.

Apesar disto, esses resultados não se correlacionam com os teores de P no solo nem na planta, observados nas Tabelas 1 e 2 sendo que o tratamento com a utilização da farinha de ossos proporcionou maiores teores podendo-se verificar, então, que mesmo havendo maiores teores de P no solo e na planta não foi o suficiente para causar efeito significativo na produtividade. Tomaz (2009) observou, avaliando o efeito residual de fontes de P, maior produtividade no primeiro ciclo de $151,15 \text{ Mg ha}^{-1}$, com a utilização da mistura das fontes de P Salmec + superfosfato triplo e a menor produtividade foi obtida com o uso do fosfato de Araxá, $136,95 \text{ Mg ha}^{-1}$. Nos

segundo e terceiro ciclos, o autor não observou diferença entre as fontes de P, em que a produtividade média foi de $85,5 \text{ Mg ha}^{-1}$. Esses resultados se assemelham aos obtidos no presente trabalho, em que no primeiro ciclo houve maior produtividade e maiores efeitos da adubação fosfatada em relação aos ciclos posteriores.

Morelli et al. (1991) obtiveram, considerando o efeito da aplicação de P em área total apenas no plantio, produtividade acumulada para cana planta + cana soca no tratamento controle de 112 Mg ha^{-1} ; com a dose de 200 kg ha^{-1} de P_2O_5 a produtividade acumulada foi de 240 t ha^{-1} e com a dose de 400 kg ha^{-1} de P_2O_5 foi de 262 t ha^{-1} . Sendo assim, nota-se que houve um incremento elevado de produtividade com a adubação fosfatada, sendo ainda mais expressivo que os ganhos observados no presente trabalho com a utilização de 100 kg ha^{-1} de P_2O_5 .

Avaliando o comportamento das variedades observa-se que a IAC86-2480 proporcionou maior produtividade de MV e MS, diferindo significativamente nos dois primeiros ciclos (Tabela 3). A produtividade média de MV para a variedade IAC86-2480 foi de $128,1 \text{ Mg ha}^{-1}$ e de $90,76 \text{ Mg ha}^{-1}$ para a SP79-1011, sendo valor superior a média obtida por Caione et al. (2011) avaliando formas de aplicação e doses de P em um Latossolo Vermelho Amarelo desta mesma região com a variedade IAC86-2480 destinada à alimentação animal, em que os autores obtiveram produtividade média de $79,5 \text{ Mg ha}^{-1}$ de fitomassa; fica evidente, então, o potencial produtivo da variedade IAC86-2480 na região que, no somatório dos três ciclos, superou em 112 Mg ha^{-1} de MV a SP79-1011, correspondendo a 41% de incremento.

Por fim, verifica-se que a eficiência agrônômica da fonte de P farinha de ossos foi superior às demais nos dois primeiros ciclos de cultivo. Para o fosfato de Arad que sua eficiência agrônômica foi crescente, havendo menores resultados na cana planta; no entanto, no terceiro ciclo os resultados foram superiores as das demais fontes de P, comprovando suas características de disponibilização gradual no solo proporcionando melhores resultados a partir do segundo ano de aplicação (Tabela 4). Sousa & Lobato (2004) descrevem que a eficiência agrônômica de fosfatos naturais é maior em solos com pH em água menor que 6,0 e que não tenham recebido excesso de calcário. Esta afirmação explica o aumento da

eficiência do fosfato de Arad entre os primeiro e segundo ciclos e entre os segundo e terceiro ciclos da cultura. O aumento da eficiência da fonte menos solúvel, fosfato de Arad, com o tempo, corrobora as informações de outros trabalhos (Horowitz & Meurer, 2003; Costa et al., 2008). Avaliando a eficiência agrônômica para a produtividade de MV durante os três ciclos nota-se superioridade da farinha de ossos e a eficiência do fosfato de Arad foi equivalente à fonte padrão (superfosfato triplo).

Tabela 4. Eficiência Agrônômica das fontes de P (fosfato de Arad e farinha de ossos) em relação ao superfosfato triplo na produção de fitomassa de cana-de-açúcar. Alta Floresta, MT, 2008, 2009 e 2010

Fontes de P	Cana planta	1ª Soca		2ª Soca	Total
		%			
Superfosfato triplo	100	100	100	100	100
Farinha de ossos	118,5	123,6	111,2	119,0	119,0
Fosfato de Arad	77,9	93,5	218,7	100,6	100,6

Conclusões

Os maiores efeitos da adubação fosfatada foram no primeiro ciclo, promovendo maior produtividade de fitomassa.

A farinha de ossos foi mais eficiente no aumento do P disponível e apresentou o maior índice de eficiência agrônômica para a produção de fitomassa da cana-de-açúcar.

O fosfato natural reativo de Arad aumentou sua eficiência agrônômica entre os ciclos de cultivo.

A variedade IAC86-2480 apresentou maior teor de P na parte aérea e maior produtividade que a SP79-1011.

Literatura Citada

Avelar, A. C.; Ferreira, W. M.; Brito, W.; Menezes, M. A. B. C. Composição mineral de fosfatos, calcário e farinha de ossos usados na Agropecuária Brasileira. *Archivos de Zootecnia*, v.58, n.224, p.737-740, 2009. <<http://scielo.isciii.es/pdf/azoo/v58n224/art12.pdf>>. 15 Dez. 2010.

Caione, G.; Teixeira, M. T. R.; Lange, A.; Silva, A. F.; Fernandes, F. M. Modos de aplicação e doses de fósforo em cana-de-açúcar forrageira cultivada em Latossolo Vermelho Amarelo. *Revista de Ciências Agro-Ambientais*, v.9, n.1, p.1-11, 2011. <http://www.unemat.br/revistas/rcaa/docs/vol9/artigo1_v9_n1_2011.pdf>. 10 Jan. 2012.

Camargo, M. S.; Barbosa, D. S.; Resende, R. H.; Korndörfer, G. H.; Pereira, H. S. Fósforo em solos de cerrado submetidos à calagem. *Bioscience Journal*, v.26, n.2, p.187-194, 2010. <<http://www.seer.ufu.br/index.php/biosciencejournal/article/view/7055/4677>>. 16 Fev. 2011.

Costa, S. E. V. G. A.; Furtini Neto, A. E.; Resende, A. V.; Silva, T. O.; Silva, T. R. Crescimento e nutrição da braquiária em função de fontes de fósforo. *Ciência e Agrotecnologia*, v.32, n.5, p.1419-1427, 2008. <<http://dx.doi.org/10.1590/S1413-70542008000500010>>. 02 Fev. 2010.

Daroub, S. H.; Pierce, F. J.; Ellis, B. G. Phosphorus fractions and fate of phosphorus-33 in soils under plowing and no-tillage. *Soil Science Society of America Journal*, v.64, n.1, p.170-176, 2000. <<http://dx.doi.org/10.2136/sssaj2000.641170x>>. 10 Jan. 2010.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. 3.ed. Rio de Janeiro, 2006. 306p.

Epstein, E.; Bloom, A. J. Nutrição mineral de plantas: princípios e perspectivas. 2.ed. Londrina: Editora Planta, 2006. 403p.

Erich, M. S.; Fitzgerald, C. B.; Porter, G. A. The effect of organic amendments on phosphorus chemistry in a potato cropping system. *Agriculture Ecosystems and Environment*, v.88, n.1, p.79-88, 2002. <[http://dx.doi.org/10.1016/S0167-8809\(01\)00147-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0167-8809(01)00147-5)>. 10 Jan. 2010.

Ferreira, D. F. Sisvar: Sistema de análise de variância. Versão 4.6. Lavras: UFLA/DEX, 2003.

Gheller, A. C. A.; Menezes, L. L.; Matsuoka, S.; Masuda, Y.; Hoffmann, H. P.; Arizono, H.; Garcia, A. A. F. Manual de método alternativo para medição da produção de cana-de-açúcar. Araras: UFSCar-CCA-DBV, 1999. 7p.

Haynes, R. J.; Mokolobate, M. S. Amelioration of Al toxicity and P deficiency in acid soils by additions of organic residues: a critical review of the phenomenon and mechanisms involved. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, v.59, n.1, p.47-63, 2001. <<http://dx.doi.org/10.1023/A:1009823600950>>. 10 Jan. 2010.

Horowitz, N.; Meurer, E. J. Eficiência de dois fosfatos naturais farelados em função do tamanho da partícula. *Ciência Rural*, v.33, n.1, p.41-47, 2003. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84782003000100007>>. 10 Jan. 2010.

Hue, N. V.; Ikawa, H.; Silva, J. A. Increasing plant available phosphorus in a ultisol with yard waste compost. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, v.25, n.19-20, p.3292-3303, 1994. <<http://dx.doi.org/10.1080/00103629409369265>>. 11 Jul. 2011.

Korndörfer, G. H.; Melo, S. P. Fontes de fósforo (fluida ou sólida) na produtividade agrícola e industrial da cana-de-açúcar. *Ciência e Agrotecnologia*, v.33, n.1, p.92-97, 2009. <<http://dx.doi.org/10.1590/S1413-70542009000100013>>. 10 Jan. 2010.

Lopes, A. S. Manual de Fertilidade do Solo. Piracicaba: Anda/Potafós, 1989. 153p.

Malavolta, E. Manual de química agrícola: adubos e adubação. 3.ed. São Paulo: Ceres, 1981. 595p.

Malavolta, E.; Vitti, G. C.; Oliveira, S. A. Avaliação do estado nutricional de plantas: princípios e aplicações. 2. ed. Piracicaba: POTAFOS, 1997. 319p.

Marwaha, B. C. Rock phosphate holds the key to productivity in acid soils – a review. *Fertiliser News*, v.34, n.3, p.23-29, 1989.

Morelli, J. L.; Nelli, E. J.; Baptistelle, L. R.; Dematê, J. L. I. Termofosfato na produtividade da cana-de-açúcar e nas propriedades químicas de um solo arenoso de baixa fertilidade. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.15, n.1, p.57-61, 1991.

Novais, R. F.; Smyth, T. J. Fósforo em solos e planta em condições tropicais. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 1999. 399p.

Oliveira, E. C. A.; Freire, F. J.; Oliveira, R. I.; Freire, M. B. G. S.; Simões Neto, D. E.; Silva, S. A. M. Extração e exportação de nutrientes por variedade de cana-de-açúcar cultivada sob irrigação plena. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.34, n.4, p.1343-1352, 2010. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832010000400031>>. 15 Mar. 2011.

- Oliveira, S. B.; Caione, G.; Camargo, M. F.; Oliveira, A. N. B.; Santana, L. Fontes de fósforo no estabelecimento e produtividade de forrageiras na região de alta floresta – MT. *Global Science and Technology*, v.5, n.1, p.01-10, 2012. <<http://rioverde.ifgoiano.edu.br/periodicos/index.php/gst/article/view/401>>. 28 Mai. 2012.
- Palharim, A. Avaliação do desempenho do fosfato natural reativo de Arad e fosfato natural reativo de Arad + enxofre na cultura da cana-de-açúcar. São Paulo: Fertilizantes Ouro Verde, 2007. 10 p. (Boletim Técnico, Série Culturas Perenes, n. 4).
- Raij, B. van.; Andrade, J. C.; Cantarella, H.; Quaggio, J. A. Análise química para avaliação da fertilidade dos solos tropicais. Campinas: Instituto Agrônomo, 2001. 285p.
- Rossetto, R.; Farhat, M.; Furlan, R.; Gil, M. A.; Silva, S. F. Eficiência agrônômica do fosfato natural na cultura da cana-de-açúcar. In: Congresso Nacional da Sociedade dos Técnicos Açucareiros e Alcooleiros do Brasil, 8., 2002, Recife. Anais... Recife: STAB, 2002. p.276-282.
- Sample, E. C.; Soper, R. J.; Racz, G. J. Reactions of phosphate in soils. In.: Khasawneh, F. E.; Sample, E. C.; Kamprath, E. J. (Eds.). *The role of phosphorus in agriculture*. Madison: American Society of Agronomy, 1980. p.263-310.
- Sanchez, P. A.; Uhera, G. Management considerations for acid soils with high phosphorus fixation capacity. In: Khasawneh, F. E.; Sample, E. C.; Kamprath, E. J. *The role of phosphorus in agriculture*. Madison: ASA; CSSA; SSSA, 1980. p. 471-514.
- Santos, D. H.; Silva, M. A.; Tiritan, C. S.; Foloni, J. S. S.; Echer, F. R. Qualidade tecnológica da cana-de-açúcar sob adubação com torta de filtro enriquecida com fosfato solúvel. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.15, n.5, p.443-449, 2011. <<http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662011000500002>>. 24 Jan. 2012.
- Santos, V. R.; Moura Filho, G.; Albuquerque, A. W.; Costa, J. P. V.; Santos, C. G.; Santos, A. C. I. Crescimento e produtividade agrícola de cana-de-açúcar em diferentes fontes de fósforo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.13, n.4, p.389-396, 2009. <<http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662009000400004>>. 10 Jan. 2010.
- Sousa, D. M. G.; Lobato, E. Cerrado: correção do solo e adubação. 2. ed. Brasília: Embrapa-CPA, 2004. 416p.
- Tomaz, H. V. Q. Fontes, doses e formas de aplicação de fósforo na cana-de-açúcar. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2009. 93p. Dissertação Mestrado. <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11136/tde-24022010-093150/pt-br.php>>. 24 Jan. 2010.