

**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Disponibilidade e eficiência de aproveitamento de fósforo pela cana-de-
açúcar sob fontes fosfatadas e torta de filtro**

Valdevan Rosendo dos Santos

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em
Ciências. Área de concentração: Solos e Nutrição de
Plantas

**Piracicaba
2017**

Valdevan Rosendo dos Santos
Engenheiro Agrônomo

**Disponibilidade e eficiência de aproveitamento de fósforo pela cana-de-açúcar
sob fontes fosfatadas e torta de filtro**

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **PAULO SERGIO PAVINATO**

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor
em Ciências. Área de concentração: Solos e Nutrição
de Plantas

Piracicaba
2017

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA - DIBD/ESALQ/USP**

Santos, Valdevan Rosendo dos

Disponibilidade e eficiência de aproveitamento de fósforo pela cana-de-açúcar sob fontes fosfatadas e torta de filtro / Valdevan Rosendo dos Santos - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011- Piracicaba, 2017.
152 p.

Tese (Doutorado) - - USP / Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”.

1. Fosfato reativo 2. Fracionamento de fósforo 3. Efeito residual 4. Solubilidade 5. Resíduo orgânico 6. Sacarose I. Título

“Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor”

DEDICATÓRIA

À minha mãe Ivonete Rosendo dos Santos

À minha esposa, Roseclênia Alves Santos

À minha filha, Lohany Nicolle Alves Rosendo

DEDICO

AGRADECIMENTOS

À DEUS por me conceder a vida e por me acompanhar durante toda a minha caminhada.

Ao meu orientador Professor Paulo Sérgio Pavinato pela orientação, amizade, paciência e apoio nos momentos de maior turbulência.

A Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo pela oportunidade de realizar o curso de doutorado.

Ao curso de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas e à sua secretária Marta Sueli de Campos, pela disponibilidade e presteza no atendimento aos pós-graduando.

A Universidade Federal de Alagoas por me conceder afastamento para qualificação e pela ajuda financeira por meio de bolsa de estudo.

Ao Campus Arapiraca e aos amigos Professores Antônio Lucrécio dos Santos Neto, Cícero Gomes dos Santos, Márcio Aurélio Lins dos Santos e Marcílio de Souza Silva por assumirem minhas disciplinas no período em que estive afastado para o doutoramento.

Às empresas Agrícola Pouso Alegre e Agrícola BPZ pela disponibilidade das áreas para a implantação dos experimentos de campo e por fornecer os recursos materiais e humanos indispensáveis para a sua execução.

Ao Engenheiro Agrônomo José Lázaro da Agrícola BPZ pela amizade, disponibilidade e apoio em todas as etapas de campo desde a instalação do experimento até a colheita. Ao Ronaldo dos Santos e Paulo César Monteiro e aos colaboradores de campo da Agrícola Pouso Alegre e Agrícola BPZ, pelo auxílio na realização das atividades de campo.

Ao Laboratório Nacional de Ciência e Tecnologia do Bioetanol - CTBE em especial aos pesquisadores Henrique Coutinho Junqueira Franco e Oriel Tiago Kölln pela importante parceria no planejamento e execução desse trabalho.

Ao pesquisador da APTA, André César Vitti pela valiosa contribuição em todas as etapas dessa pesquisa e pelo importante auxílio técnico, principalmente em relação ao manejo da cultura da cana-de-açúcar.

Ao Fábio Ricardo Coutinho Fontes César pela amizade desde antes do início do doutorado, pelo apoio na fase de doutorado e pelo auxílio na confecção de gráficos.

Ao Aijânio Gomes de Brito Silva pela boa convivência e pelo auxílio providencial na lavagem de raízes.

Aos meus amores Roseclênia Alves Santos e Lohany Nicolle pelo auxílio na lavagem de raiz e por fazerem parte e renovarem a minha vida a cada dia.

Aos colegas de equipe: Marcos Rodrigues, Wilfrand Ferney Bejarano Herrera, Ana Paula Bettoni Teles, Ioná Rech, José Carlos Rojas Garcia (Peruano), Bruna Arruda e Marta Coelho Arruda, pela boa convivência e pela ajuda nas atividades de campo, laboratório e discussão para a materialização desse trabalho.

Aos estagiários do Grupo de Estudos em Fertilidade e Adubação (GEFA): Aline de Camargo Santos, Gabriel Novoletti e Vinícius Marcelo.

Ao doutorando Marcos Rodrigues pelo aprendizado e apoio nas análises laboratoriais, interpretação de resultados e por viabilizar a vinda dos colegas estagiários Cassiano Cavali e Patrick Santos, os quais juntos foram fundamentais na preparação das amostras e na execução das análises de fracionamento de fósforo.

Ao Diogo Paes pela importante parceria no projeto, nas avaliações de campo e auxílio na formatação dessa tese.

Ao pós-doutorando Amin Soltangheisi pelo auxílio nas análises estatísticas e na construção dos artigos.

Ao laboratório de fertilidade do solo da Esalq e aos seus técnicos Luiz Silva, Ednéia Mondoni, Marina Colzato e José Roberto pelo apoio na realização das análises e pelo exemplo de profissionalismo.

Ao laboratório de Microbiologia Agrícola e aos técnicos Denise Mescolotti e Luís Fernando Baldesin pela compreensão e apoio no uso de equipamentos fundamentais nas análises de fracionamento.

Ao laboratório de Química em especial aos Professores Marcos Yassuo Kamogawa e Marcelo Eduardo Alves e a técnica de laboratório Lenita Maria C. Pacheco E. Oliveira por nos apoiar nas análises de tecidos de planta.

Aos Professores José Lavres Júnior e Cássio Hamilton e a técnica Cleusa Cabral por gentilmente permitirem a realização das análises de tecido de plantas no Laboratório de Nutrição Mineral de Plantas do Centro de Energia Nuclear na Agricultura – CENA.

Ao Professor Carlos Tadeu dos Santos Dias e a Professora Sônia Maria De Stefano Piedade pela colaboração na parte de delineamento e pelo suporte nas análises estatísticas.

E a todos aqueles que de forma direta ou indireta contribuíram para a realização desse trabalho.

Obrigado a todos!

EPÍGRAFE

“Se fiz descobertas valiosas, foi mais por ter paciência do que qualquer outro talento”

(Isaac Newton)

“O valor do homem é determinado, em primeira linha, pelo grau e pelo sentido em que se libertou do seu ego”

(Albert Einstein)

SUMARIO

RESUMO	9
ABSTRACT	10
LISTA DE FIGURA	11
LISTA DE TABELAS	17
1. INTRODUÇÃO	19
Referências	24
2. PRODUTIVIDADE DA CANA-DE-AÇÚCAR E EFEITOS NO P DO SOLO DE FONTES E FORMAS DE APLICAÇÃO DA ADUBAÇÃO FOSFATADA	29
Resumo	29
Abstract	29
2.1. Introdução.....	30
2.2. Material e métodos	33
2.2.1. Caracterização das áreas experimentais	33
2.2.2 Implantação e condução dos experimentos	38
2.2.3 Tratamentos.....	40
2.2.4 Delineamento experimental	41
2.2.5 Avaliações realizadas	41
2.2.6 Procedimentos estatísticos	47
2.3 Resultados e discussão	47
2.3.1 Rendimento e extração de P	47
2.3.2 Fracionamento do P do solo	59
2.4 Considerações finais / Conclusões	80
Referências	80
3. FÓSFORO NO SOLO E PRODUTIVIDADE DA CANA-DE-AÇÚCAR SOB FONTES FOSFATADAS ASSOCIADAS À TORTA DE FILTRO.....	89
Resumo.....	89
Abstract	89
3.1. Introdução.....	90
3.2 Material e Métodos.....	92
3.2.1 Tratamentos.....	93
3.2.2 Delineamento experimental	95
3.2.4 Avaliações realizadas	95
3.2.5 Procedimentos estatísticos	95
3.3 Resultados e discussão	95
3.3.1 Rendimento e extração de P.....	95
3.3.2 Fracionamento do P do solo.....	106
3.4 Considerações finais / Conclusões	143
Referências	144
ANEXOS.....	150

RESUMO

Disponibilidade e eficiência de aproveitamento de fósforo pela cana-de-açúcar sob fontes fosfatadas e torta de filtro

O fornecimento de P à cana-de-açúcar é feito normalmente com fontes de alta solubilidade distribuídas de forma localizada no sulco de plantio. A solubilidade dessas fontes favorecem aos processos de adsorção/precipitação do P solúvel aos componentes do solo, reduzindo a recuperação do P aplicado. Fontes reativas podem ser uma alternativa por liberarem P de forma gradual, diminuindo as reações com os constituintes do solo e apresentarem eficiência semelhante às fontes solúveis em solos ácidos. A associação de fontes inorgânicas de P com torta de filtro deve aumentar a produtividade e melhorar a eficiência da adubação fosfatada. Esta pesquisa avaliou o efeito de fontes de fósforo solúvel e reativa, associadas à torta de filtro, no rendimento industrial e na produtividade de colmo da cana-de-açúcar e as alterações nas formas de P do solo. Foram conduzidos dois experimentos de campo para avaliar i) o comportamento de fonte solúvel e reativa na dose recomendada de 180 kg ha^{-1} de P_2O_5 , aplicada a lanço, sulco e misto (50/50) e ii) avaliar as fontes utilizando metade da dose e a dose total recomendada em associação com 10 t ha^{-1} de torta de filtro ambas aplicadas no sulco de plantio. Houve aumento do rendimento de açúcar total recuperável (ATR), tonelada de pol por hectare (TPH) e colmos industrializáveis na cana soca da área de expansão com a adição de fertilizantes fosfatados, destacando a importância da adubação para a manutenção da produtividade em solos deficientes em P. A adição de fertilizante associado com torta de filtro aumentou o rendimento de ATR, TPH e de colmos industrializáveis e a extração de P pela cana planta na área de expansão e apenas a extração de nutrientes na área estabelecida. Em áreas que receberam sequências de adubação fosfatada o declínio da produtividade deve demorar mais tempo do que em área sem a adição de P. A fonte solúvel manteve mais P nas frações P-resina, Pi-bic e Pi-hid0.1 nas camadas 10-20 e 20-40 cm quando aplicada no sulco, enquanto a fonte reativa elevou o P-Ca na camada 0-10 cm e 10-20 cm no modo lanço ou 50/50. A fonte reativa manteve quantidades menores de P lábil do que a fonte solúvel, mas suficientes para atender a demanda da planta. As reservas de P do solo da área estabelecida foram suficientes para suprir adequadamente a cana-planta. A eficiência de recuperação do P foi baixa alcançando 20% nos dois anos na área de expansão e foi negativa na área estabelecida. O P-resina, Pi-bic e Pi-hid0.1 tenderam a serem alterados pelo ST na presença de torta e geralmente acompanhou o aumento da dose enquanto o P-HCl e o Pi-hid0.5 são alterados pelo FNR e aumenta com a dose na presença da torta com pouca influência na área estabelecida. A associação da torta de filtro com a fonte reativa pode ser uma boa opção de manejo em função da maior liberação de P pela torta no primeiro ano de aplicação e pelo importante efeito residual do fosfato reativo ao longo dos ciclos da cultura.

Palavras-chave: Fosfato reativo; Fracionamento; Efeito residual; Solubilidade; Resíduo orgânico; Sacarose

ABSTRACT

Phosphorus use efficiency and availability in sugarcane cultivated under different phosphate sources and filter cake

The supply of P to sugar cane is usually done with water soluble P sources placement in a localized way in the planting furrow. The solubility of these sources favors the adsorption/precipitation processes of the soluble P to the soil components, reducing the recovery of the applied P. Reactive sources may be an alternative for release P gradually, reducing reactions with soil constituents and presenting similar efficiency to sources soluble in acid soils. The association of inorganic sources P with filter cake should increase productivity and improve the efficiency of phosphate fertilization. This research evaluated the effect of soluble and reactive phosphorus sources, associated with filter cake, on industrial yield and yield of sugarcane stem and changes in soil P forms. Two field experiments were conducted to evaluate i) the behavior of soluble and reactive source at the recommended dose of 180 kg ha⁻¹ of P₂O₅ applied broadcast, furrow and mixed (50/50) and ii) to evaluate the sources using half of the rate and the total recommended rate in association with 10 t ha⁻¹ of filter cake both applied in the planting furrow. There was an increase in the yield of total recoverable sugar (TRS), tonne of sugar per hectare (TSH), and mill stalks in the first ratoon of the expansion area with the addition of phosphate fertilizers, emphasizing the importance of fertilization to maintain productivity in very low P content. The addition of fertilizer associated with filter cake increased the yield of TRS, TSH and mill stalks and the extraction of P by the cane plant in the expansion area and only the extraction of nutrients in the established area. In areas that received phosphate fertilization sequences the productivity decline should take longer than in the area without the addition of P. The soluble source maintained more P in the fractions P-resin, Pi-bic and Pi-hid0.1 in layers 10 -20 and 20-40 cm when applied to the furrow while the reactive source raised the P-Ca in the 0-10 cm layer and 10-20 cm in the broadcast or 50/50. The reactive source maintained smaller amounts of labile P than the soluble source, but sufficient to meet plant demand. The P reserves of the soil of the established area were enough to adequately supply the cane plant. The recovery efficiency of P was low reaching 20% in the two years in the expansion area and was negative in the established area. The P-resin, Pi-bic and Pi-hid0.1 tended to be altered by TSP in the presence of filter cake and generally accompanied the increase in rate while P-HCl and Pi-hid0.5 are altered by RP and increase with rate in the presence of the filter cake with little influence in the established area. The association of the filter cake with the reactive source can be a good management option due to the greater release of P by the filter cake in the first year of application and by the important residual effect of the reactive phosphate throughout the cycles of the culture.

Keywords: Reactive phosphate; Fractionation; Residual effect; Solubility; Organic waste; Sucrose

LISTA DE FIGURA

- Figura 1. Localização geográfica dos experimentos de campo, no Estado de São Paulo, Brasil..... 33
- Figura 2. Precipitação pluviométrica no período de 2013 a 2015 no experimento de agudo, SP, Brasil.
..... 34
- Figura 3. Difractogramas de raios-X da fração argila tratada com DCB (A) e sem tratamento (B) de amostra de solo da camada de 0-20 cm em Agudos-SP. An: anatásio, Cl: clorita, Gb: gibbsita, Hm: hematita, Kt: caulinita..... 34
- Figura 4. Precipitação pluviométrica no período de 2014 a 2015 no experimento de Macatuba, SP, Brasil..... 37
- Figura 5. Difractogramas de raios-X da fração argila tratada com DCB (C) e sem tratamento (D) de amostra de solo da camada 0-20 cm em Macatuba-SP. Gb: gibbsita, Hm: hematita, Kt: caulinita..... 37
- Figura 6. Toletes de cana distribuídos no sulco de plantio, fazenda Glória, Agudos-SP..... 38
- Figura 7. Vista geral da distribuição dos toletes da variedade de cana CTC-16 no sulco de plantio, fazenda Pouso Alegre, Macatuba-SP..... 39
- Figura 8. Separação das partes das plantas amostradas para biometria. Colmo (A), folha seca (B) e ponteiro (C)..... 42
- Figura 9. Máquina picadora e acessórios, utilizados para a obtenção de subamostras da parte aérea da cana-de-açúcar para determinação da extração de nutrientes. 42
- Figura 10. Pesagem dos colmos total industrializáveis das parcelas, fazenda Glória, Agudos-SP. 2014.
..... 43
- Figura 11. Desdobramentos da extração de P pela folha, colmo e P total extraído pela cana-de-açúcar em diferentes fontes de fósforo e modos de aplicação da adubação fosfatada. Agudos 2014 (A), Agudos 2015 (B) e Macatuba 2015 (C-E). *indica diferença entre os tratamentos e o controle pelo teste de Dunnett ($p < 0,05$). Letras maiúsculas compara as fontes de P em cada modo de aplicação e minúscula compara o modo de aplicação em cada fonte pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). 51
- Figura 12. Desdobramentos das interações das frações de P da camada 0-10 e 10-20 cm de solo cultivado com cana-de-açúcar em fontes de fósforo e modos de aplicação da adubação fosfatada, Agudos 2014. P-HCl 0-10 cm (A), Pi-bic 10-20 cm (B) e P-inorgânico 10-20 cm (C). Letras minúsculas comparam o modo de aplicação em cada fonte e maiúsculas comparam as fontes de P em cada modo de aplicação pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). * indica diferença entre os tratamentos avaliados e o tratamento controle pelo teste de Dunnett ($p < 0,05$ e minúscula compara o modo de aplicação em cada fonte). 63
- Figura 13. Desdobramentos das interações das frações de P da camada 20-40 cm de solo cultivado com cana-de-açúcar em fontes de fósforo e modos de aplicação da adubação fosfatada, Agudos 2014. Pi-bic (A), P-residual (B), P-não lábil (C) e P-inorgânico (D). Letras minúsculas comparam o modo de aplicação em cada fonte e maiúsculas comparam as fontes de P em cada modo de aplicação pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). * indica diferença entre os tratamentos avaliados e o tratamento controle pelo teste de Dunnett ($p < 0,05$). 65
- Figura 14. Desdobramentos das interações das frações de P da camada 0-10 e 10-20 cm de solo cultivado com cana-de-açúcar em fontes e modos de aplicação da adubação fosfatada, Agudos 2015. P-HCl (A), P-total (B), P-moderadamente lábil (C) e P-orgânico (D) 0-10 cm e P-HCl (E) e P-residual (F) 10-20 cm. Letras minúsculas comparam o modo de aplicação

em cada fonte e maiúsculas comparam as fontes de P em cada modo de aplicação pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). * indica diferença entre os tratamentos avaliados e o tratamento controle pelo teste de Dunnett ($p < 0,05$)..... 70

- Figura 15. Desdobramentos das interações das frações de P da camadas 20-40 cm de solo cultivado com cana-de-açúcar em fontes de fósforo e modos de aplicação da adubação fosfatada, Agudos 2015. P-resina (A), Pi-hid0.1 (B), P-HCl (C), P-residual (D), Pi-hid0.5 (E) e P-lábil (F). Letras minúsculas comparam o modo de aplicação em cada fonte e maiúsculas comparam as fontes de P em cada modo de aplicação pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). * indica diferença entre os tratamentos avaliados e o tratamento controle pelo teste de Dunnett ($p < 0,05$)..... 71
- Figura 16. Desdobramentos das interações das frações de P da camada 0-10 cm de solo cultivado com cana-de-açúcar em fontes de fósforo e modos de aplicação da adubação fosfatada, Macatuba 2015. Pi-bic (A), P-HCl (B), P-residual (C), P-não lábil (D) e P-inorgânico (E). Letras minúsculas comparam o modo de aplicação em cada fonte e maiúsculas comparam as fontes de P em cada modo de aplicação pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). * indica diferença entre os tratamentos avaliados e o tratamento controle pelo teste de Dunnett ($p < 0,05$). 76
- Figura 17. Desdobramentos das interações das frações de P da camada 10-20 cm de solo cultivado com cana-de-açúcar em fontes de fósforo e modos de aplicação da adubação fosfatada, Macatuba 2015. P-resina (A), Po-bic (B), Po-hid0.1 (C), Pi-hid0.5 (D) e P-lábil (E). Letras minúsculas comparam o modo de aplicação em cada fonte e maiúsculas comparam as fontes de P em cada modo de aplicação pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). * indica diferença entre os tratamentos avaliados e o tratamento controle pelo teste de Dunnett ($p < 0,05$). 77
- Figura 18. Desdobramentos das interações das frações de P da camada 20-40 cm de solo cultivado com cana-de-açúcar em fontes de fósforo e modos de aplicação da adubação fosfatada, Macatuba 2015. Po-bic (A), P-HCl (B) e P-lábil (C). Letras minúsculas comparam o modo de aplicação em cada fonte e maiúsculas comparam as fontes de P em cada modo de aplicação pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). * indica diferença entre os tratamentos avaliados e o tratamento controle pelo teste de Dunnett ($p < 0,05$)..... 79
- Figura 19. Área experimental com vista dos baldes utilizados na distribuição da torta de filtro, fazenda Pouso Alegre, Macatuba-SP..... 93
- Figura 20. Vista geral da torta e dos toletes da variedade de cana CTC 16, distribuídos no sulco de plantio, fazenda Pouso Alegre, Macatuba-SP 94
- Figura 21. Desdobramento da interação do P extraído pela folha e pelo ponteiro e massa seca do ponteiro da cana-de-açúcar em fontes e doses de fósforo com e sem aplicação de 10 t ha^{-1} de torta de filtro, Agudos 2014. Torta x fonte de P (A) e fonte x dose de P (B, C e D). Letras minúsculas comparam cada fonte na presença ou na ausência de torta ou cada dose na fonte super triplo ou no fosfato reativo e maiúsculas comparam cada fonte na ausência e na presença de torta ou cada dose na fonte super triplo e no fosfato reativo pelo teste de Tukey ($p < 0,05$)..... 98
- Figura 22. Desdobramento da interação tripla do P extraído pelo colmo e P total extraído pela cana-de-açúcar em fontes e doses de fósforo com e sem aplicação de 10 t ha^{-1} de torta de filtro, Agudos 2014. P extraído pelo colmo (A e B) e P total extraído (C e D). Letras gregas comparam as doses em cada fonte na ausência ou na presença de torta, minúscula compara cada dose entre fontes na presença ou na ausência de torta e maiúsculas comparam cada dose da mesma fonte na ausência e na presença de torta, pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). 99
- Figura 23. Desdobramento da interação do P extraído pelo colmo da cana-de-açúcar em fontes e doses de fósforo com e sem aplicação de 10 t ha^{-1} de torta de filtro em Agudos 2015. Torta x fonte

- de P (A) e fonte x dose de P (B). Letras minúsculas comparam as fontes na presença ou na ausência de torta ou cada dose na fonte super triplo ou no fosfato reativo e maiúsculas comparam cada fonte na ausência e na presença de torta ou cada dose na fonte super triplo e no fosfato reativo pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). 102
- Figura 24. Desdobramento da interação dupla da fração P-resina do solo (20-40 cm) cultivado com cana-de-açúcar em doses de fósforo na presença e ausência de 10 t ha⁻¹ de torta de filtro, Agudos 2014. Letras minúsculas comparam as doses na presença ou na ausência de torta de filtro e maiúsculas comparam cada dose na presença e na ausência de torta pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). 111
- Figura 25. Desdobramento da interação dupla da fração P-HCl do solo (20-40 cm) cultivado com cana-de-açúcar em doses de fósforo na presença e ausência de 10 t ha⁻¹ de torta de filtro, Agudos 2014. Letras minúsculas comparam as doses na presença ou na ausência de torta de filtro e maiúsculas comparam cada dose na presença e na ausência de torta pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). 112
- Figura 26. Desdobramento da interação dupla da fração P-total do solo (20-40 cm) cultivado com cana-de-açúcar em doses de fósforo na presença e ausência de 10 t ha⁻¹ de torta de filtro, Agudos 2014. Letras minúsculas comparam as doses na presença ou na ausência de torta de filtro e maiúsculas comparam cada dose na presença e na ausência de torta pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). 113
- Figura 27. Desdobramento da interação dupla da fração P-lábil do solo (20-40 cm) cultivado com cana-de-açúcar em doses de fósforo na presença e ausência de 10 t ha⁻¹ de torta de filtro, Agudos 2014. Letras minúsculas comparam as doses na presença ou na ausência de torta de filtro e maiúsculas comparam cada dose na presença e na ausência de torta pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). 113
- Figura 28. Desdobramento da interação dupla das frações P-HCl e Pi-hid0.5 do solo (20-40 cm) cultivado com cana-de-açúcar em fontes e doses de fósforo, Agudos 2014. P-HCl (A) e Pi-hid0.5 (B). Letras minúsculas comparam as doses em cada fonte e maiúsculas comparam as fontes em cada dose pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). 114
- Figura 29. Desdobramento da interação dupla das frações P-total, P-moderadamente lábil e P-inorgânico do solo (20-40 cm) cultivado com cana-de-açúcar em fontes e doses de fósforo, Agudos 2014. P-total (A), P-moderadamente lábil (B) e P-inorgânico (C). Letras minúsculas comparam as doses em cada fonte e maiúsculas comparam as fontes em cada dose pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). 116
- Figura 30. Desdobramento da interação tripla das frações Pi-bic e Po-hid0.1 do solo (20-40 cm) cultivado com cana-de-açúcar em fontes e doses de fósforo na presença e ausência de 10 t ha⁻¹ de torta de filtro, Agudos 2014. Pi-bic e Po-hid0.1 com torta (A e C) e Pi-bic e Po-hid0.1 sem torta (B e D), Letras gregas comparam as doses em cada fonte na ausência ou presença de torta, minúsculas comparam cada dose entre fontes na presença ou ausência de torta, maiúsculas comparam cada dose da mesma fonte na ausência e presença de torta pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). 117
- Figura 31. Desdobramento da interação dupla da fração Po-bic do solo (0-20 cm) cultivado com cana-de-açúcar em fontes de fósforo na presença e ausência de 10 t ha⁻¹ de torta de filtro, Agudos 2015. Letras minúsculas comparam as fontes na presença ou ausência de torta e maiúsculas comparam cada fonte na presença e ausência de torta pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). 119
- Figura 32. Desdobramento da interação dupla da fração P-resina do solo (0-20 cm) cultivado com cana-de-açúcar em doses de fósforo na presença e ausência de 10 t ha⁻¹ de torta de filtro, Agudos 2015. Letras minúsculas comparam as doses na presença ou na ausência de torta de

- filtro e maiúsculas comparam cada dose na presença e na ausência de torta pelo teste de Tuhey ($p < 0,05$)..... 119
- Figura 33. Desdobramento da interação dupla da fração Pi-bic do solo (0-20 cm) cultivado com cana-de-açúcar em doses de fósforo na presença e ausência de 10 t ha⁻¹ de torta de filtro, Agudos 2015. Letras minúsculas compara as doses na presença ou na ausência de torta de filtro e maiúsculas comparam cada dose na presença e na ausência de torta pelo teste de Tuhey ($p < 0,05$). 119
- Figura 34. Desdobramento da interação dupla das frações Pi-hid0.1 e P-HCl do solo (0-20 cm) cultivado com cana-de-açúcar em doses de fósforo na presença e ausência de 10 t ha⁻¹ de torta de filtro, Agudos 2015. Pi-hid0.1 (A) e P-HCl (B). Letras minúsculas compara as doses na presença ou na ausência de torta de filtro e maiúsculas comparam cada dose na presença e na ausência de torta pelo teste de Tuhey ($p < 0,05$). 121
- Figura 35. Desdobramento da interação dupla das frações Po-hid0.5 e P-residual do solo (0-20 cm) cultivado com cana-de-açúcar em doses de fósforo na presença e ausência de 10 t ha⁻¹ de torta de filtro, Agudos 2015. Po-hid0.5 (A) e P-residual (B). Letras minúsculas compara as doses na presença ou na ausência de torta de filtro e maiúsculas comparam cada dose na presença e na ausência de torta pelo teste de Tuhey ($p < 0,05$). 122
- Figura 36. Desdobramento da interação dupla da frações P-lábil e P-moderadamente lábil do solo (0-20 cm) cultivado com cana-de-açúcar em doses de fósforo na presença e ausência de 10 t ha⁻¹ de torta de filtro, Agudos 2015. P-lábil (A) e P-moderadamente lábil (B). Letras minúsculas compara as doses na presença ou na ausência de torta de filtro e maiúsculas comparam cada dose na presença e na ausência de torta pelo teste de Tuhey ($p < 0,05$). 123
- Figura 37. Desdobramento da interação dupla do P-total e P-não lábil do solo (0-20 cm) cultivado com cana-de-açúcar em doses de fósforo na presença e ausência de 10 t ha⁻¹ de torta de filtro, Agudos 2015. P-total (A) e P-não lábil (B). Letras minúsculas compara as doses na presença ou na ausência de torta de filtro e maiúsculas comparam cada dose na presença e na ausência de torta pelo teste de Tuhey ($p < 0,05$)..... 124
- Figura 38. Desdobramento da interação dupla do P-inorgânico do solo (0-20 cm) cultivado com cana-de-açúcar em doses de fósforo na presença e ausência de 10 t ha⁻¹ de torta de filtro, Agudos 2015. Letras minúsculas compara as doses na presença ou na ausência de torta de filtro e maiúsculas comparam cada dose na presença e na ausência de torta pelo teste de Tuhey ($p < 0,05$). 124
- Figura 39. Desdobramento da interação dupla das frações Pi-bic e P-HCl do solo (0-20 cm) cultivado com cana-de-açúcar em fontes e doses de fósforo, Agudos 2015. Pi-bic (A) e P-HCl (B). Letras minúsculas compara as doses em cada fonte de P e maiúsculas comparam cada dose nas duas fontes pelo teste de Tuhey ($p < 0,05$). 125
- Figura 40. Desdobramento da interação dupla do P-residual do solo (0-20 cm) cultivado com cana-de-açúcar em fontes e doses de fósforo, Agudos 2015. Pi-bic. Letras minúsculas compara as doses em cada fonte de P e maiúsculas comparam cada dose nas duas fontes pelo teste de Tuhey ($p < 0,05$)..... 126
- Figura 41. Desdobramento da interação tripla da fração Pi-bic do solo (0-20 cm) cultivado com cana-de-açúcar em fontes e doses de fósforo na presença e ausência de 10 t ha⁻¹ de torta de filtro, Agudos 2015. Letra grega compara as doses em cada fonte na ausência ou presença de torta, minúsculas compara cada dose entre fontes na presença ou ausência de torta, maiúsculas compara cada dose da mesma fonte na ausência e presença de torta pelo teste de Tuhey ($p < 0,05$). 126

- Figura 42. Desdobramento da interação dupla das frações Po-bic e Po-hid0.5 do solo (20-40 cm) cultivado com cana-de-açúcar em fontes de fósforo na presença e ausência de 10 t ha⁻¹ de torta de filtro, Agudos, 2015. Po-bic (A) e Po-hid0.5 (B). Letras minúsculas compara as fontes na presença ou ausência de torta e maiúsculas comparam cada fonte na presença e ausência de torta pelo teste de Tuhey ($p < 0,05$)..... 129
- Figura 43. Desdobramento da interação dupla da fração P-resina do solo (20-40 cm) cultivado com cana-de-açúcar em doses de fósforo na presença e ausência de 10 t ha⁻¹ de torta de filtro, Agudos 2015. Letras minúsculas compara as doses na presença ou na ausência de torta de filtro e maiúsculas comparam cada dose na presença e na ausência de torta pelo teste de Tuhey ($p < 0,05$). 130
- Figura 44. Desdobramento da interação dupla das frações Pi-hid0.5 e Po-hid0.5 do solo (20-40 cm) cultivado com cana-de-açúcar em fontes e doses de fósforo, Agudos, 2015. Pi-hid0.5 (A) e Po-hid0.5 (B). Letras minúsculas compara as doses em cada fonte de P e maiúsculas comparam cada dose nas duas fontes pelo teste de Tuhey ($p < 0,05$)..... 131
- Figura 45. Desdobramento da interação dupla do P-residual do solo (20-40 cm) cultivado com cana-de-açúcar em fontes e doses de fósforo, Agudos, 2015. Letras minúsculas compara as doses em cada fonte de P e maiúsculas comparam cada dose nas duas fontes pelo teste de Tuhey ($p < 0,05$)..... 131
- Figura 46. Desdobramento da interação tripla das frações P-HCl e do P-total do solo (20-40 cm) cultivado com cana-de-açúcar em fontes e doses de fósforo na presença e ausência de 10 t ha⁻¹ de torta de filtro, Agudos 2015. P-HCl e do P-total com torta (A e C) e P-HCl e do P-total sem torta (B e D), Letra grega compara as doses em cada fonte na ausência ou presença de torta, minúsculas compara cada dose entre fontes na presença ou ausência de torta, maiúsculas compara cada dose da mesma fonte na ausência e presença de torta pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). 132
- Figura 47. Desdobramento da interação tripla do P-moderadamente lábil e do P-inorgânico do solo (20-40 cm) cultivado com cana-de-açúcar em fontes e doses de fósforo na presença e ausência de 10 t ha⁻¹ de torta de filtro, Agudos 2015. P-moderadamente lábil e P-inorgânico com torta (A e C) e P-moderadamente lábil e P-inorgânico sem torta (B e D), Letra grega compara as doses em cada fonte na ausência ou presença de torta, minúsculas compara cada dose entre fontes na presença ou ausência de torta, maiúsculas compara cada dose da mesma fonte na ausência e presença de torta pelo teste de Tukey ($p < 0,05$)..... 133
- Figura 48. Desdobramento da interação dupla do P-moderadamente lábil do solo (0-20 cm) cultivado com cana-de-açúcar em doses de fósforo na presença e ausência de 10 t ha⁻¹ de torta de filtro, Macatuba, 2015. Letras minúsculas compara as doses na presença ou na ausência de torta e maiúsculas comparam cada dose na presença e na ausência de torta pelo teste de Tuhey ($p < 0,05$)..... 136
- Figura 49. Desdobramento da interação dupla da fração P-resina do solo (0-20 cm) cultivado com cana-de-açúcar em fontes e doses de fósforo, Macatuba, 2015. Letras minúsculas compara as doses em cada fonte de P e maiúsculas comparam cada dose nas duas fontes pelo teste de Tuhey ($p < 0,05$). 137
- Figura 50. Desdobramento da interação dupla da fração P-HCl do solo (0-20 cm) cultivado com cana-de-açúcar em fontes e doses de fósforo, Macatuba, 2015. Letras minúsculas compara as doses em cada fonte de P e maiúsculas comparam cada dose nas duas fontes pelo teste de Tuhey ($p < 0,05$). 137
- Figura 51. Desdobramento da interação dupla da fração P-HCl do solo (20-40 cm) cultivado com cana-de-açúcar em fontes de fósforo na presença e ausência de 10 t ha⁻¹ de torta de filtro,

Macatuba, 2015. Letras minúsculas compara as fontes na presença ou ausência de torta e maiúsculas comparam cada fonte na presença e ausência de torta pelo teste de Tuhey ($p < 0,05$). 140

Figura 52. Desdobramento da interação dupla das frações Po-bic e P-HCl do solo (20-40 cm) cultivado com cana-de-açúcar em doses de fósforo na presença e ausência de 10 t ha⁻¹ de torta de filtro, Macatuba, 2015. Po-bic (A) e P-HCl (B). Letras minúsculas compara as doses na presença ou na ausência de torta e maiúsculas comparam cada dose na presença e na ausência de torta pelo teste de Tuhey ($p < 0,05$)..... 140

Figura 53. Desdobramento da interação dupla da fração Pi-hid0.5 e P-lábil do solo (20-40 cm) cultivado com cana-de-açúcar em doses de fósforo na presença e ausência de 10 t ha⁻¹ de torta de filtro, Macatuba, 2015. Pi-hid0.5 (A) e P-lábil (B). Letras minúsculas compara as doses na presença ou na ausência de torta e maiúsculas comparam cada dose na presença e na ausência de torta pelo teste de Tuhey ($p < 0,05$). 141

Figura 54. Desdobramento da interação dupla das frações Pi-hid0.5 e P-residual do solo (20-40 cm) cultivado com cana-de-açúcar em fontes e doses de fósforo, Macatuba, 2015. Pi-hid0.1 (A) e P-residual (B). Letras minúsculas compara as doses em cada fonte de P e maiúsculas comparam cada dose nas duas fontes pelo teste de Tuhey ($p < 0,05$)..... 142

Figura 55. Desdobramento da interação dupla do P-inorgânico do solo (20-40 cm) cultivado com cana-de-açúcar em fontes e doses de fósforo, Macatuba, 2015. Letras minúsculas compara as doses em cada fonte de P e maiúsculas comparam cada dose nas duas fontes pelo teste de Tuhey ($p < 0,05$)..... 143

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Atributos químicos, mineralógicos e frações granulométricas dos solos das duas áreas de avaliação, Agudos e Macatuba-SP.....	36
Tabela 2. Tratamentos aplicados na ocasião da implantação dos experimentos nos dois locais de avaliação, Agudos e Macatuba.	41
Tabela 3. Concentração de fósforo total e solúvel nas fontes utilizadas no experimento.	41
Tabela 4. Médias dos rendimentos agrícola e industrial, massa seca e extração de P pela cana-de-açúcar em fontes e formas de aplicação da adubação fosfatada nas safras 2014 e 2015 em Agudos e 2015 em Macatuba.....	48
Tabela 5. Eficiência agrônômica-industrial e de recuperação do P aplicado no solo pela cana-de-açúcar de fontes e formas de aplicação da adubação fosfatada em Agudos e Macatuba - 2014 e 2015.	56
Tabela 6. Análise de variância e contrastes de frações de fósforo em amostras de solo cultivado com cana-de-açúcar sob diferentes fontes/modos de aplicação da adubação fosfatada, Agudos-SP, 2014.	60
Tabela 7. Frações de fósforo em amostras de solo cultivado com cana-de-açúcar sob diferentes fontes e modos de aplicação da adubação fosfatada, Agudos-SP, 2014.....	61
Tabela 8. Análise de variância e contrastes de frações de fósforo em amostras de solo cultivado com cana-de-açúcar em diferentes fontes e modos de aplicação da adubação fosfatada, Agudos-SP, 2015.....	67
Tabela 9. Frações de fósforo em amostras de solo cultivado com cana-de-açúcar sob diferentes fontes e modos de aplicação da adubação fosfatada, Agudos-SP, 2015.....	68
Tabela 10. Análise de variância e contrastes de frações de fósforo em amostras de solo cultivado com cana-de-açúcar sob diferentes fontes e modos de aplicação da adubação fosfatada, Macatuba-SP, 2015.....	73
Tabela 11. Frações de fósforo em amostras de solo cultivado com cana-de-açúcar sob diferentes fontes e modos de aplicação da adubação fosfatada, Macatuba-SP, 2015.	74
Tabela 12. Descrição dos tratamentos aplicados na ocasião da implantação dos experimentos no campo.....	94
Tabela 13. Concentração de fósforo total e solúvel nas fontes utilizadas no experimento.	94
Tabela 14. Resultado das análises da torta de filtro utilizadas nos experimentos em Agudos e Macatuba-SP.....	94
Tabela 15. Rendimento agrícola e industrial, massa seca e extração de P pela cana-de-açúcar sob fontes e doses de fosfatos associadas com torta de filtro, Agudos-SP, 2014.....	96
Tabela 16. Médias de rendimento agrícola e industrial, massa seca e extração de P pela cana-de-açúcar sob fontes e doses de fósforo associado com torta de filtro, Macatuba-SP 2015.	100
Tabela 17. Médias de rendimento agrícola e industrial, massa seca e extração de P pela cana-de-açúcar sob fontes e doses de fósforo associado com torta de filtro, Agudos-SP, 2015.....	102
Tabela 18. Eficiência agrônômica e industrial e aproveitamento pela cana-de-açúcar do fósforo aplicado no solo em fontes e doses de fósforo associadas com torta de filtro em Agudos e Macatuba, no período 2014 a 2015.....	104

Tabela 19. Valores médios de frações de fósforo (mg kg^{-1}), teste F e contraste de amostras de solo da camada 0-20 cm cultivado com cana-de-açúcar em fontes e doses de fósforo associadas com torta de filtro, Agudos-SP, 2014.	107
Tabela 20. Médias de frações de fósforo (mg kg^{-1}), teste F e contraste de amostras de solo da camada 20-40 cm cultivado com cana-de-açúcar em fontes e doses de fósforo associadas com torta de filtro, Agudos-SP, 2014.	110
Tabela 21. Médias de frações de fósforo (mg kg^{-1}), teste F e contraste de amostras de solo da camada 0-20 cm cultivado com cana-de-açúcar em fontes e doses de fósforo associadas com torta de filtro, Agudos-SP, 2015.	118
Tabela 22. Médias de frações de fósforo (mg kg^{-1}), teste F e contraste de amostras de solo da camada 20-40 cm cultivado com cana-de-açúcar em fontes e doses de fósforo associadas com torta de filtro, Agudos-SP, 2015.	127
Tabela 23. Médias de frações de fósforo (mg kg^{-1}), teste F e contraste de amostras de solo da camada 0-20 cm cultivado com cana-de-açúcar em fontes e doses de fósforo associadas com torta de filtro, Macatuba, 2015.	135
Tabela 24. Médias de frações de fósforo (mg kg^{-1}), teste F e contraste de amostras de solo da camada 20-40 cm cultivado com cana-de-açúcar em fontes e doses de fósforo associadas com torta de filtro, Macatuba, 2015.	139

1. INTRODUÇÃO

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, seguido da Índia e da China (FAO, 2013). A estimativa da área cultivada com cana-de-açúcar para a safra 2016/17 ultrapassa os 9 milhões de hectares e produção de 691 milhões de toneladas de cana, com produtividade média de 76 toneladas por hectare; 37,5 milhões de toneladas de açúcar e 30 bilhões de litros de etanol. A região Sudeste responde por 63% da área cultivada e o estado de São Paulo é o maior produtor com 52% de toda área cultivada no País, cerca de 4,7 milhões de hectares e produção de 381 milhões de toneladas, com produtividade média de 80 toneladas por hectare. Esses números representam um aumento de 3,8% em comparação à safra anterior (CONAB, 2016).

A cana apresenta importância destacada para o PIB nacional com a exportação de açúcar e etanol, além da geração de empregos. A cadeia produtiva desta cultura registrou crescimento de 5% no ano de 2015, alcançando mais de R\$ 110 bilhões (CEPEA, 2015). As atividades de produção de cana como matéria prima no campo e a produção na indústria de açúcar, etanol e energia elétrica a partir da matéria produzida geram cerca de 1,2 milhão de empregos diretos (MORAES; OLIVEIRA, 2016).

As áreas utilizadas com cana para a produção de açúcar e bioetanol no Brasil podem ser separadas em áreas tradicionalmente cultivadas com cana-de-açúcar ao longo de décadas, localizadas em solos de melhor fertilidade natural ou com fertilidade construída ao longo das sequências de fertilizações e áreas de expansão, principalmente em áreas antes ocupadas com pastagem, estimulada pela crescente demanda global por bioenergia em alternativa aos combustíveis fósseis mais poluentes (CHERUBIN et al., 2016).

Em geral, as áreas de expansão se apresentam degradadas e são classificadas como ambientes de produção de baixas produtividades, com solos ácidos, de baixa fertilidade natural e com predomínio de teores de fósforo (P) disponível de muito baixo a médio (ROSSETTO; DIAS; VITTI, 2008). Nesses ambientes os ganhos de produtividade dependem do uso de corretivos, da adição de matéria orgânica, do manejo adequado de variedades e do aporte de fertilizantes minerais, principalmente com P (GUO et al., 2011).

A cana-de-açúcar extrai quantidades relativamente pequenas de P do solo, cerca de 20 kg ha⁻¹, mas esse nutriente exerce papel chave nos processos metabólicos da planta como fotossíntese, respiração, obtenção e transferência de energia, biossíntese de ácidos nucléico e membranas celulares e tem influência destacada na formação do sistema radicular, no perfilhamento, desenvolvimento de internódios e na formação de sacarose (CLEMETS, 1980; MEYER; WOOD, 2001).

O P é tido como um nutriente de baixo aproveitamento pelas plantas e doses de 180 kg ha⁻¹ de P₂O₅ são utilizadas para a cana-de-açúcar (ORLANDO FILHO et al., 1994) em função do efeito dreno apresentado por esses solos, competindo com a planta pelo P aplicado via fertilizante (NOVAIS; SMITH, 1999). A baixa mobilidade do P no solo é um dos principais fatores limitantes para a produtividade das culturas em todo o mundo. O P total do solo pode chegar a 3000 mg kg⁻¹ de solo, mas, na solução do solo, as concentrações são muito baixas para atender à demanda das plantas (PARFITT, 1979; HOLFORD, 1997).

Os processos envolvidos nas transformações de P do solo são precipitação/dissolução e adsorção/dessorção, os quais controlam a transferência do P geoquímico entre a fase sólida e a solução e os processos biológicos imobilização/mineralização que controlam a transformação de P entre as formas inorgânicas e orgânicas (FROSSARD et al., 2000).

Devido à baixa mobilidade do P no perfil do solo, a sua distribuição é geralmente mais crítica que a do nitrogênio. Dependendo do solo e de fatores ambientais, a aplicação localizada pode ou não ser melhor que a aplicação de P a lanço com incorporação. A forma de aplicação mais comum da adubação fosfatada na cana-de-açúcar é a aplicação da dose total no sulco de plantio, para atender a cana planta e as soqueiras subsequentes, com o uso de fontes altamente solúveis (LIMA FILHO; ZAMBELLO JÚNIOR; ORLANDO FILHO, 1982; ROSSETTO; DIAS; VITTI, 2008).

Em solos tropicais, com predomínio de óxidos de Fe e Al na fração argila, a rápida liberação inicial do P dessas fontes pode favorecer aos processos de adsorção e precipitação das formas solúveis aos componentes do solo, formando compostos de baixa solubilidade (SANCHEZ; UEHARA, 1980; TIESSEN, 2005), diminuindo a sua disponibilidade para as plantas. No outro extremo, os fosfatos naturais de baixa solubilidade não conseguem manter níveis adequados de P para as plantas, em virtude de sua baixa velocidade inicial de dissolução, embora aumente o seu efeito residual com o passar do tempo (GUO et al., 2011; SHIGAKI; SHARPLEY, 2011).

Os fosfatos naturais reativos de origem sedimentar surgem como fontes alternativas, em função da elevação dos preços das fontes solúveis e da forte retenção que estas sofrem nos solos dos trópicos úmidos. A reatividade dos fosfatos naturais reativos está relacionada com a substituição isomórfica de carbonato (CO₃²⁻) por fosfato (PO₄³⁻) e minerais acessórios na estrutura da apatita, tornando-os porosos e com relativamente alta superfície de área específica (SANYAL; DE DATTA, 1991). Quanto maior o grau de substituição de carbonato por fosfato na estrutura cristalina do mineral maior será a sua instabilidade e reatividade no solo (KHASAWNEH; DOLL, 1978; CHIEN; MENON, 1995).

Os fosfatos reativos apresentam eficiência equivalente às fontes de alta solubilidade quando aplicados em solos ácidos (CHIEN et al., 2011). Corrêa et al. (2005) observaram que o fosfato de gafsa apresentou eficiência equivalente ao superfosfato triplo na produção de matéria seca e absorção de P pelo milho quando incorporado ao solo.

Na cultura da cana-de-açúcar, o fosfato reativo foi tão efetivo quanto os fosfatos altamente solúveis quando aplicado no sulco de plantio para cana planta (SANTOS et al., 2009; CAIONE et al., 2015). Aplicado a lanço, em solo baixo em P e com alta capacidade de sorção, o fosfato reativo obteve eficiência agrônômica em relação ao super triplo (ST) de 93, 105 e 101% para cana planta, soca e ressoca, respectivamente (REIN; SOUSA, 2013). Isso é um indicativo de que essa fonte apresenta bom potencial para fornecer P para a cana-de-açúcar em alternativa às fontes solúveis. Nessa mesma condição, para o ST, o rendimento de colmos nos três anos foi melhor quando essa fonte teve a dose de 200 kg ha⁻¹ de P₂O₅ aplicada toda a lanço ou metade dessa dose a lanço + metade no sulco em comparação com a forma localizada no sulco de plantio (REIN; SOUSA, 2013). Os resultados obtidos sugerem que o aumento no rendimento da cana e a eficiência do fertilizante em solos com baixo P e alta sorção deve ser alcançado com o aumento do volume de solo fertilizado com P no plantio e/ou com a associação de aplicação em área total e localizada para fontes solúveis.

Esses resultados são contrários ao recomendado para essa fonte. Nessa condição de solo, seria recomendado que a dose de P fosse distribuída de forma localizada, restringindo o contato com maior volume de solo para diminuir as reações de P com o solo, aumentando a sua eficiência. Isso estimularia as raízes a se concentrarem na região fertilizada e aumentaria o seu influxo por unidade de área para compensar o menor volume de solo explorado (ANGHINONI; BARBER, 1980; BORKERT; BARBER, 1985). A recomendação deve ser o contrário para fontes de baixa solubilidade como os fosfatos naturais, os quais devem ser moídos e misturados com o volume total de solo (KHASAWNEH; DOLL, 1978; SHIGAKI; SHARPLEY, 2011). Enquanto as fontes de P prontamente solúveis formam compostos de baixa disponibilidade com maior intensidade, diminuindo o seu efeito residual ao longo do tempo, os fosfatos reativos, promovem a liberação do P de forma gradual, ao longo do tempo de sua aplicação, diminuindo a sua adsorção pelos constituintes do solo (KORNDÖRFER; MELO, 2009; GIKONYO et al., 2010; FREITAS et al., 2013).

A dissolução de fosfato de rocha em solo ácido pode ser representada como $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2 + 12 \text{H}^+ \Rightarrow 10 \text{Ca}^{2+} + 6 \text{H}_2\text{PO}_4^- + 2 \text{F}^-$. Solos com alta capacidade de adsorção de P, baixo pH e alta capacidade de troca de cátions favorecerão a dissolução de fosfato de rocha (GHOSAL et al., 2003). A espécie utilizada também pode melhorar a dissolução da apatita,

alterando o pH do solo próximo as raízes pela liberação de ácidos orgânicos, bem como pela absorção de ânions e de cátion, funcionando como um dreno, principalmente para o cálcio (RAIJ; VAN DIEST, 1979). O cálcio é considerado o principal fator que influencia a dissolução de um fosfato de rocha e na ausência de um dreno para o P e o Ca dissolvido do fosfato de rocha, o pH terá pouca influência (ROBINSON; SYERS, 1990).

Com a diminuição das reservas fosfáticas, a elevação dos preços dos fertilizantes, os problemas ambientais e a possível garantia da segurança alimentar da população crescente, têm-se buscado estratégias para aumentar a eficiência do uso do P e diminuir o impacto sobre as finitas reservas de P. Dentre essas estratégias, está o aproveitamento de resíduos orgânicos. A matéria orgânica pode fornecer P e liberar ácidos orgânicos, que podem melhorar a disponibilidade e a eficiência de fertilizantes solúveis e de fosfatos naturais reativos (RIVERO et al., 2004; GIKONYO et al., 2010; OLIBONE; ROSOLEM, 2010).

A indústria da cana-de-açúcar produz um volume bastante grande de subprodutos no processo da produção de açúcar, etanol e energia elétrica a partir da biomassa. Dentre esses, destaca-se a torta de filtro, produzida durante o processo de clareamento do caldo da cana. Para cada tonelada de cana processada, são produzidos de 30 a 40 kg de torta de filtro (SOLOMON, 2011; DOTANIYA et al., 2016). Considerando que a produção do país é de 690 milhões de toneladas de cana, teríamos um volume de torta superior a 20 milhões de toneladas, o que seria suficiente para se aplicar 20 t ha^{-1} em uma área de 1 milhão de hectares. A composição da torta de filtro pode variar de acordo com a variedade utilizada, tipo de solo, maturação da cana, eficiência da moagem e com o processo de clarificação do caldo (YADAV; SOLOMON, 2006; SOLOMON, 2011).

A utilização da torta de filtro, como fertilizante para os solos, é uma promissora e sustentável opção de destino desse subproduto e uma forma de agregar valor ao processo de produção industrial. Esse resíduo tem sido uma fonte de matéria orgânica e nutriente intensamente utilizada em substituição total ou parcial de N e P. Dentre os nutrientes principais, podemos notar uma predominância de P, N e cálcio e menores teores de potássio, enxofre, magnésio e micronutrientes (CORTEZ et al., 1992; DEE; HAYNES; GRAHAM, 2003).

Na literatura, há bastante relatos dos efeitos promovidos pela torta de filtro no solo e no aumento da produtividade de colmos e de açúcar, mas também há relatos da pouca influência em algumas situações (MOBERLY; MEYER, 1978). Trabalhos têm relatado que, em solos com alta capacidade de adsorção de P, a utilização de torta de filtro reduziu a adsorção de P do solo e aumentou a disponibilidade do nutriente para as plantas,

principalmente em solos com maior conteúdo de carbono orgânico e diminuiu as concentrações de alumínio trocável (KHAN et al., 2012; ULTAMI et al., 2012), possivelmente devido à liberação de radicais orgânicos produzidos pela torta, os quais podem competir com o P pelos sítios de adsorção dos minerais do solo (SIBANDA; YOUNG, 1986; PAVINATO; ROSOLEM, 2008).

Outros estudos têm destacado que a aplicação da torta de filtro aumenta o conteúdo de carbono orgânico e as concentrações de P e Ca e eleva a CTC do solo. A retenção de cátions deve aumentar em virtude do aumento do C orgânico e da CTC, sendo importante para adubações com potássio, o qual teve a dose reduzida de 240 kg ha⁻¹ para 160 kg ha⁻¹ de K₂O na presença de 100 t ha⁻¹ de torta de filtro aplicada em área total, possivelmente devido ao aumento da retenção de nutrientes (RODELLA; SILVA; ORLANDO FILHO, 1990), pela liberação de cargas negativas bloqueadas na CTC. A aplicação no sulco de plantio aumentou o comprimento do colmo, o número de plantas por hectare, a produtividade da cana e a produção de açúcar, sendo recomendado o uso da torta associada com adubação mineral para maximizar o efeito sobre a produtividade e reduzir os custos com fertilizantes minerais (YADUVANSHI; YADAV; SINGH, 1990; GILBERT et al., 2008; ALMEIDA JÚNIOR et al., 2011).

Os dados da literatura mostram que os efeitos da torta de filtro na produção de colmo e no rendimento de açúcar ocorrem com maior destaque no ciclo de cana planta, cujo fornecimento de 10 ou mais t ha⁻¹ no sulco de plantio supre a demanda de P da planta e parte ou total do N (PRASAD, 1976; MOBERLY; MEYER, 1978; RODELLA; SILVA; ORLANDO FILHO, 1990; CAIONE et al., 2015). Os efeitos nas soqueiras estão mais relacionados com doses acima de 50 t ha⁻¹ ou com a aplicação de menores quantidades no sulco, associadas com uma dosagem maior em área total (MOBERLY; MEYER, 1978; RODELLA; SILVA; ORLANDO FILHO, 1990; GILBERT et al., 2008; FRAVET et al., 2010).

Revisões recentes têm destacado a importância de reciclagem de nutrientes, particularmente do P por meio da torta de filtro e da sua capacidade na melhoria das condições da fertilidade dos solos cultivados com cana-de-açúcar e o aumento na produtividade de colmo e açúcar por unidade de área (PRADO et al., 2013; DOTANIYA et al., 2016). Com isso, acredita-se que a adição de torta de filtro em associação com fontes de P de solubilidades distintas possam interagir de forma diferente em áreas com boa fertilidade e em áreas de expansão com solos de menor fertilidade.

Portanto, as hipóteses deste trabalho são: 1) fontes de fósforo de menor solubilidade disponibilizam o nutriente de forma gradativa e em quantidades adequadas ao longo dos ciclos de cultivo da cana-de-açúcar, promovendo um melhor aproveitamento do nutriente; 2) as formas de aplicação alteram a dinâmica do P no solo, sua disponibilidade e sua eficiência de uso pela cana, com melhor eficiência para fonte solúvel aplicada de forma localizada no sulco de plantio; 3) o uso de fertilizantes associados com a torta de filtro diminui a adsorção de P no solo em função da competição dos compostos orgânicos por sítios de adsorção, promovendo maior eficiência no uso do nutriente pela planta; 4) a associação das fontes com a torta de filtro alteram a dinâmica e as formas de P do solo, sendo essa alteração diferenciada para áreas de expansão e áreas já estabelecidas por décadas com cana-de-açúcar.

Sendo assim, o objetivo geral foi avaliar o efeito de fontes de fósforo solúvel e reativa, associadas à torta de filtro, no rendimento industrial e na produtividade de colmo da cana-de-açúcar e as alterações nas formas de P do solo em áreas de expansão e em áreas bem estabelecidas com a cultura.

Para isso, os objetivos específicos são: a) comparar o efeito das fontes no rendimento da cultura e na disponibilidade de P nos solos; b) definir a melhor forma de aplicação dos adubos fosfatados para os solos avaliados; c) verificar o comportamento das fontes e formas de aplicação nos diferentes tipos de solo; d) avaliar os efeitos do uso da torta de filtro na disponibilidade de P, no rendimento e eficiência de uso do nutriente pela cana-de-açúcar; e) verificar as mudanças promovidas nas frações de fósforo do solo em função da adição de fertilizantes fosfatados associados com torta de filtro.

A tese foi elaborada em dois capítulos: “1 - Produtividade da cana-de-açúcar e efeitos no P do solo de fontes e formas de aplicação da adubação fosfatada”; e “2 - Fósforo no solo e produtividade da cana-de-açúcar sob fontes fosfatadas associadas à torta de filtro”.

Referências

ALMEIDA JÚNIOR, A.B.; NASCIMENTO, C.W.A.; SOBRAL, M.F.; SILVA, F.B.V.; GOMES, W.A. Fertilidade do solo e absorção de nutrientes em cana-de-açúcar fertilizada com torta de filtro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.15, n.10, p.1004-1013, 2011.

ANGHINONI, I.; BARBER, S.A. Phosphorus application rate and distribution in the soil and phosphorus uptake by corn. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v.44, p.1041-1044, 1980.

BORKERT, C.M.; BARBER, S.A. Soybean shoot and root growth and phosphorus concentration as affected by phosphorus placement. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v.49, p.152-155, 1985.

CAIONE, G.; PRADO, R.M.; CAMPOS, C.N.S. MODA, L.R.; VASCONCELOS, R.L.; PIZAURO JÚNIOR, J.M Response of sugarcane in a red ultisol to phosphorus rates, phosphorus sources, and filter cake. **The Scientific World Journal**, Cairo, v.2015, Article ID 405970, 10 p. 2015. doi:10.1155/2015/405970. <http://dx.doi.org/10.1155/2015/405970>

CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA - CEPEA. Relatório do PIB das Cadeias: análises do acumulado de 2015. 13p. Disponível em: <http://cepea.esalq.usp.br/pibpec/>. Acesso em: 03 jul. 2016.

CHERUBIN et al. Phosphorus pools responses to land-use change for sugarcane expansion in weathered Brazilian soils. **Geoderma**, Amsterdam, v.265, p.27-38, 2016.

CHIEN, S.H.; MENON, R.G. Factors affecting the agronomic effectiveness of phosphate rock for direct application. **Fertilizer Research**, Dordrecht, v.41, n.3, p.227-234, 1995.

CHIEN, S.H.; PROCHNOW, L.I.; TU, S.; SNYDER, C.S. Agronomic and environmental aspects of phosphate fertilizers varying in source and solubility: an update review. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v.89, p.229-255, 2011.

CLEMENTS, H.F. **Sugarcane crop logging and crop control: principles and practice**. Hawaii: The University of Hawaii Press. 1980. 520p.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO/CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira: cana-de-açúcar, 3º levantamento safra 2015/16**, Brasília, 2015.70p. Disponível em:http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1253&ordem=criterioSafra1&Pagina_objcmsconteudos=1#A_objcmsconteudos. Acesso em: 09 abr. 2016.

CORRÊA, R. M.; NASCIMENTO, C. W. A.; SOUZA, S. K. S.; FREIRE, F.J.; SILVA, G. B. Gafsa rock phosphate and triple superphosphate for dry matter production and P uptake by corn. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v.62, n.2, p.159-164, 2005.

CORTEZ, L.; MAGALHAES, P.; HAPPI, J. Principais subprodutos da agroindústria canavieira e sua valorização. **Revista Brasileira de Energia**, Itajubá, v.2, n.2, p.1-17, 1992.

DEE, B.M.; HAYNES, R.J.; GRAHAM, M.H. Changes in soil acidity and the size and activity of the microbial biomass in response to the addition of sugar mill wastes. **Biology and Fertility Soils**, Berlin, v.37, p. 47-54, 2003.

DOTANIYA, M.L.; DATTA, S.C.; BISWAS, D.R.; DOTANIYA, C.K.; MEENA, B.L.; RAJENDIRAN, S.; REGAR, K.L.; LATA, M. Use of sugarcane industrial by-products for improving sugarcane productivity and soil health. **International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture**, New York, v.5, n.3, p.185-194, 2016.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS - Rome, 2015. World fertilizer trends and outlook to 2018. Roma, 2015. 66p. Disponível em: <http://www.fao.org/3/a-i4324e.pdf>. Acesso em: 28 set. 2016.

FRAVET, P.R.F.; SOARES, R.A.B.; LANA, R.M.Q.; LANA, A.M.Q.; KORNDÖRFER, G.H. Efeito de doses de torta de filtro e modo de aplicação sobre a produtividade e qualidade tecnológica da soqueira de cana-de-açúcar. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.34, n.3, p. 618-624, 2010.

FREITAS, I.F.; NOVAIS, R.F.; VILLANI, E.M.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**, Viçosa, v.37, n.3, p.667-677, 2013

FROSSARD, E.; CONDRON, L. M.; OBERSON, A.; SINAJ, S.; FARDEAU, J. C. Processes governing phosphorus availability in temperate soils. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.29, n.1, p.15-23, 2000.

GHOSAL, P.K.; CHAKRABORTY, T.; BHATTACHARYA, B.; BAGCHI, D.K. Relative agronomic effectiveness of phosphate rocks and P adsorption characteristics of an Oxid Rhodustalf in Eastern India. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Rostock, v. 166, p.750-755, 2003.

GIKONYO, E.W.; ZAHARAH, A.R.; HANAFI, M.M. Extractable Bray-1 phosphorus and crop yields as influenced by addition of phosphatic fertilizers of various solubilities integrated with manure in an acid soil. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v.88, n.1, p.79-90, 2010.

GILBERT, R.A.; MORRIS, D.R.; RAINBOLT, C.R.; MCCRAY, J.M.; PERDOMO, R.E.; EILAND, B.; POWELL, G.; MONTES, G. Sugarcane response to mill mud, fertilizer, and soybean nutrient sources on a sandy soil. **Agronomy Journal**, Madison, v.100, n.3, p.845-854, 2008.

GUO, H.C.; ZHANG, Q.C.; WANG, G.H.; CHIEN, S.H. Phosphorus fractions of soils treated with phosphate rock and monocalcium phosphate after ryegrass growth. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Philadelphia, v.42, p.93-99, 2011.

HOLFORD, I.C.R. Soil phosphorus: its measurement, and its uptake by plants. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v.35, n.2, p.227-239, 1997.

KHAN, K.S.; CASTILLO, X.; WICHERN, F.; DYCKMANS, J.; JOERGENSEN, R.G. Interactions of mustard plants and soil microorganisms after application of sugarcane filter cake and pea residues to an Andosol. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Tharandt, v.175, p.931-938, 2012.

KHASAWNEH, F.E.; DOLL, E.C. The use of phosphate rock for direct application to soils. **Advances in Agronomy**, San Diego, v 30, p.159-206, 1978.

KORNDÖRFER, G.H.; MELO, S.P. Fontes de fósforo (fluida ou sólida) na produtividade agrícola e industrial da cana-de-açúcar. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.33, n.1, p.92-97, 2009.

LIMA FILHO, S.A., ZAMBELLO JÚNIOR, E., ORLANDO FILHO, J. Doses e fontes de fósforo em cana-planta no Estado de São Paulo. **Saccharum**, São Paulo, v.5, n.21, p.37-43, 1982.

MEYER, J.H.; WOOD, R.A. The effects of soil fertility and nutrition on sugarcane quality: a review. **Proceedings of The South African Sugar Technologists Association**, Durban, v.75, p.242-247, 2001.

MOBERLY, P.K.; MEYER, J.H. Filter cake – a field and glasshouse evaluation. **Proceedings of The South African Sugar Technologists Association**, Durban, v.52, p.131-136, 1978.

MORAES, M.A.F.D.; OLIVEIRA, F.C.R. Sugarcane ethanol in Brazil: socio-economic issues. In: LAN, E.; CARRER, H.; SILVA, J.A.; KOLE, C. (Eds.). **Compendium of bioenergy plants: sugarcane**, 2016. Chap. 6, p.89-107.

NOVAIS, R.F., SMYTH, T.J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa: UFV, 1999. 399p

OLIBONE, D.; ROSOLEM, C.A. Phosphate fertilization and phosphorus forms in a Oxisol under no-till. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.67, n.4, p.465-471, 2010.

ORLANDO FILHO, J., MACEDO, N., TOKESHI, H. Seja o doutor do seu canavial. **Arquivo do agrônomo** n.6, Piracicaba: POTAFOS, 1994

PARFITT, R.L. The availability of P from phosphate-goethite bridging complexes: desorption and uptake by ryegrass. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.53, n.1/2, p.55-65, 1979.

PAVINATO, P.S.; MERLIN, A.; ROSOLEM, C.A. Phosphorus fraction in Brazilian Cerrado soils as affected by tillage. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.105, p.149-155, 2009.

PRADO, R.M.; CAIONE, G.; CAMPOS, C.N.S. Filter cake and vinasse as fertilizers contributing to conservation agriculture. **Applied and Environmental Soil Science**, Cairo, v.2013, Article ID 581984, 8p., 2013. doi:10.1155/2013/581984. <http://dx.doi.org/10.1155/2013/581984>

PRASAD, M. Response of sugarcane to filter press mud and N, P, and K fertilizers. I. effect on sugarcane yield and sucrose content. **Agronomy Journal**, Madison, v.68, n.4, p.539-543, 1976.

RAIJ, B. van; VAN DIEST, A. Utilization of phosphate from different sources by six plant species. **Plant and Soil**, Amsterdam, v.51, n.4, p.577-589, 1979.

REIN, T.A.; SOUSA, D.M.G. Sugarcane response to phosphorus sources and placement in a very clayey oxisol of the Brazilian Cerrado. **Proceedings International Society Sugar Cane Technologists**, Vera Cruz, v.28, p.1-9, 2013.

RIVERO, C.; CHIRENJE, T.; MA, L.Q.; MARTINEZ, G. Influence of compost on soil organic matter quality under tropical conditions. **Geoderma**, Amsterdam, v.123, p.355-361, 2004.

ROBINSON, J.S.; SYERS, J.K. A critical evaluation of the factors influencing the dissolution of gafsa phosphate rock. **Journal of Soil Science**, Oxford, v.41, p.597-605, 1990.

RODELLA, A.A.; SILVA, L.C.F.; ORLANDO FILHO, J. Effects of filter cake application on sugarcane yields, **Turrialba**, Cartago, v.40, n.3, p.323-326, 1990.

ROSSETTO, R.; DIAS, F.L.F.; VITTI, A. Problemas nutricionais dos solos nas novas fronteiras canvieiras, **Idea News**, São Paulo, v.8, n.94, p.78-90, 2008.

SANCHEZ, P.A.; UEHARA, G. Management considerations for acid soils with high fixation capacity. In: KHASAWNEH, F.E.; SAMPLE, E.C.; KAMPRATH, E.J. (Eds.) **The role of phosphorus in agriculture**. Madison: ASA-CSSA-SSSA, 1980. chap. 17, p.471-514.

SANTOS, V.R.; MOURA FILHO, G.; ALBUQUERQUE, A.W.; COSTA, J.P.V.; GOMES, C.G.; SANTOS, A.C.I. Crescimento e produtividade de cana-de-açúcar em diferentes fontes de fósforo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.13, n.4, p.389-396, 2009.

SANYAL, S.K.; DE DATTA, SK. Chemistry of phosphorus transformations in soil. **Advances in Soil Science**, New York, v.16, p.1-120, 1991.

SHIGAKI, F.; SHARPLEY, A. Phosphorus source and soil properties effects on phosphorus availability. **Soil Science**, Hague, v.176, n.9, p.502-507, 2011.

SIBANDA, H.M.; YOUNG, S.D. Competitive adsorption of humus acids and phosphate on goethite, gibbsite and two tropical soils. **Journal of Soil Science**, Oxford, v.37, p.197-204, 1986.

SOLOMON, S. Sugarcane by-products based industries in Índia. **Sugar Tech**, New Delhi, v.13, n.4, p.408-416, 2011.

TIESSEN, H. Phosphorus dynamics in tropical soils. In: SIMS, J.T.; SHARPLEY, A.N. (Eds). **Phosphorus: agriculture and the environment** Madison: ASA-CSSA-SSSA, 2005. chap. 8, p.253-262. (Number 46: series agronomy).

UTAMI, S.R.; KURNIAWAN, S.; SITUMORANG, B.; ROSITASARI, N.D. Increasing P-availability and P-uptake using sugarcane filter cake and rice husk ash to improve chinese cabbage (*Brassica Sp*) growth in andisol, East Java. **Journal of Agricultural Science**, Toronto, v.4, n.10, p.153-160, 2012.

YADAV, R.L.; SOLOMON, S. Potential of developing sugarcane by-product based industries in India. **Sugar Tech**, New Delhi, v.8, n.2-3, p.104-111, 2006.

YADUVANSHI, N.P.S.; YADAV, D.V.; SINGH, T. Economy in fertilizer nitrogen by its integrated application with sulphitation filter cake on sugarcane. **Biological Wastes**, Amsterdam, v.32, p.75-79, 1990.

2. PRODUTIVIDADE DA CANA-DE-AÇÚCAR E EFEITOS NO P DO SOLO DE FONTES E FORMAS DE APLICAÇÃO DA ADUBAÇÃO FOSFATADA

Resumo

Fontes de P reativas devem ser uma alternativa promissora para o suprimento de P à cana-de-açúcar, em substituição aos fosfatos solúveis, de custos mais elevados. Objetivando-se avaliar o efeito de fontes solúvel e reativa em diferentes modos de aplicação no rendimento da cana-de-açúcar e na dinâmica do P no solo foram conduzidos dois experimentos de campo em: i) área de expansão de pasto para cana e ii) em área estabelecida com cana-de-açúcar por longo período. A área de expansão apresenta solo de textura franco arenosa, com teor muito baixo de P e baixa adsorção de fosfato. A área estabelecida fica em solo pobre em P, de textura muito argilosa, com alta capacidade de adsorção. A fonte solúvel foi o super triplo e reativa foi o gafsa na área de expansão e o bayóvar na área estabelecida. A dose de 180 kg ha⁻¹ de P₂O₅ foi distribuída a lanço, no sulco e de forma mista (50/50). Amostras de solo de 0-10, 10-20 e 20-40 cm na linha da cana foram submetidas ao fracionamento de P pelo método de Hedley. Avaliou-se o rendimento de açúcar total recuperável (ATR), tonelada de açúcar por hectare (TPH) e a produtividade de colmo por hectare. Não houve diferenças entre fontes, entre modos de aplicação e nem interação para o rendimento de ATR, TPH e a produtividade de colmo na cana planta e soca na área de expansão e nem na cana planta da área estabelecida. Houve aumento da produtividade de ATR, TPH e colmos industrializáveis na cana soca da área de expansão com a adição de fertilizantes fosfatados, destacando a importância da adubação para a manutenção da produtividade em solos deficientes em P. Em áreas que receberam sequências de adubação fosfatada o declínio da produtividade deve demorar mais tempo do que em área sem a adição de P. A fonte solúvel manteve mais P nas frações P-resina, Pi-bic e Pi-hid0.1 nas camadas 10-20 e 20-40 cm quando aplicada no sulco, enquanto a fonte reativa elevou o P-Ca na camada 0-10 cm e 10-20 cm no modo lanço ou 50/50. A fonte solúvel aumentou o P-residual e o P-não lábil quando foi misturada com maior volume de solo (50/50), sugerindo adsorção do P no solo. A gradativa dissolução do P da fonte reativa não aumentou as frações de P recalitrantes no solo com alta adsorção. A adubação fosfatada aumentou o rendimento agrícola e industrial da cana soca na área de expansão de Agudos. A fonte solúvel, manteve mais P nas formas lábeis e moderadamente lábeis e a fonte reativa acumulou mais P na forma de P-Ca nas duas áreas estudadas. A fonte reativa manteve quantidades menores de P lábil do que a fonte solúvel, mas suficientes para atender a demanda da planta. Os modos de aplicação alteram as formas de P do solo com melhor eficiência da fonte solúvel no sulco e da reativa em maior contato com o solo. As reservas de P do solo da área estabelecida foram suficientes para suprir adequadamente a cana-planta.

Palavras-chave: Disponibilidade de fósforo; Fracionamento; Fosfato reativo; Labilidade

Abstract

Rock phosphate reactive sources should be a promising alternative for the supply of P to sugarcane, replacing the soluble phosphates, more expensive ones. In order to evaluate the effect of reactive and soluble sources in different methods of application on sugarcane yield and soil P dynamics, two field experiments were conducted in: i) pasture expansion area for cane and ii) established area with sugarcane for a long period. The expansion area is located in sandy loam soil with very low P content and low phosphate adsorption. The established area with cane is in poor soil P level, of very clayey texture, with high capacity of adsorption. The Bayóvar in the established area. The rate of 180 kg ha⁻¹ of P₂O₅ was distributed as broadcast, at furrow and a mix of both (50/50). Soil samples of 0-10, 10-20 and 20-40 cm were taken in the cane plant line and submitted to P fractionation by the Hedley method. The yield of total recoverable sugar (TRS), tonne sugar per hectare (TSH) and cane yield were evaluated. There were no differences between sources, between methods of application and nor interaction for the yield of TRS, TSH and yield of cane in the cane plant and 1st ratoon in the area of expansion and nor in the cane plant of the established area. There was an increase in the productivity of TRS, TSH and cane yield of the expansion area with the addition of phosphate fertilizers, emphasizing the importance of fertilization to maintain productivity

in P deficient soils. In areas that received phosphate fertilization decrease in productivity should take longer than in area without the addition of P. The soluble source maintained more P in the fractions P-resin, Pi-bic and Pi-hid0.1 in the layers 10-20 and 20-40 cm when applied in the furrow, while the reactive source raised P-Ca in the 0-10 cm layer and 10-20 cm in the broadcast and 50/50. The soluble source increased P-residual and P-non-labile when it was mixed with higher soil volume (50/50), suggesting soil P adsorption. The gradual dissolution of the reactive source P did not increase the recalcitrant P fractions in the soil with high adsorption. Phosphate fertilization increased the agricultural and industrial yield of the 1st ratoon in the area of expansion of Agudos. The soluble source maintained more P in the labile and moderately labile forms and the reactive source accumulated more P in the form of P-Ca in the two studied areas. The reactive source maintained smaller amounts of labile P than the soluble source, but sufficient to meet plant demand. The application methods alter the P forms of the soil with better efficiency of the soluble source in the furrow and of the reactive in greater contact with the soil. The P reserves of the soil of the established area were enough to adequately supply the cane-plant.

Keywords: Availability of phosphorus; Fractionation; Reactive phosphate; Lability

2.1. Introdução

A deficiência de fósforo (P) do solo é um dos fatores mais limitantes para o crescimento e produtividade das culturas, principalmente em solos tropicais mais intemperizados e argilosos. A adição de fertilizantes fosfatados é necessária para suprir a necessidade de P disponível no solo e atender à demanda da planta pelo nutriente.

Embora as fontes minerais desse nutriente tenham como matéria prima as rochas coletivamente denominadas de apatitas, essas variam largamente em solubilidade, indo de formas insolúveis a formas totalmente solúveis. Os fosfatos naturais são fontes obtidas a partir da moagem da apatita e podem ser aplicados diretamente no solo (ZAPATA; ROY, 2004). Fosfatos naturais obtidos de rochas ígneas, como os fosfatos brasileiros, têm como principal limitação a sua baixa reatividade, sendo denominado de fosfato não reativo em função de apresentarem uma estrutura cristalina dura, sem superfícies internas, que diminui a sua área superficial específica (NOVAIS; SMITH, 1999).

Apatitas de origem sedimentar, como o fosfato da Carolina do Norte, Gafsa, Arad e Bayóvar são de natureza microcristalina e consistem de agregados de microcristais suficientemente abertos e frouxamente consolidados com relativamente grande área superficial específica, que geralmente está associada a substituição isomórfica de CO_3^{2-} por PO_4^{3-} e por minerais acessórios na estrutura do mineral. Essas substituições alteram o tamanho das láticas do cristal e promovem a instabilidade física e química do mineral, tornando-o mais reativo, todavia é necessário ser finamente moído (mínimo 100 mesh) para máxima eficácia (KHASAWNEH; DOLL, 1978). Esses fosfatos reativos são adequados para aplicação direta no solo e serão mais efetivos em condições de solos com muito baixo P, ácidos e com maior dreno para Ca e P (ROBINSON; SYERS, 1990).

As principais fontes solúveis em água são o superfosfato simples (SS), superfosfato triplo (ST), fosfato monoamônio (MAP) e fosfato diamônio (DAP), com mais de 90% do P solúvel e prontamente disponível para uso pelas plantas (CHIEN et al., 2011). O fornecimento da recomendação de P para a cana-de-açúcar é comumente feito em uma única aplicação no plantio com o uso de fontes de elevada solubilidade, em função da sua maior eficiência agronômica. No entanto, a rápida liberação inicial do P dessas fontes pode favorecer ao processo de adsorção/precipitação de P solúvel aos componentes do solo, formando compostos de baixa solubilidade (SANCHEZ; UEHARA, 1980; TIESSEN, 2005), principalmente com óxidos de Fe e Al, causando a diminuição na sua disponibilidade para as plantas (NOVAIS; SMITH, 1999; RANDHAWA et al., 2006).

Por outro lado, fosfatos naturais de baixa solubilidade normalmente não conseguem manter níveis adequados de P disponível às plantas, em virtude da baixa velocidade inicial de dissolução. Os fosfatos de menor solubilidade geralmente aumentam o P solúvel com o aumento da dose e o tempo de contato com o solo (GUO et al., 2011; SHIGAKI; SHARPLEY, 2011). Fontes de alta solubilidade tendem a diminuir as quantidades de P solúvel de acordo com o tempo de contato com o solo, principalmente em solos com alta capacidade de adsorção. Essa diminuição é consequência da rápida liberação de P de fontes solúveis e das reações de precipitação com Fe, Al e Ca, seguida das reações de sorção com os constituintes minerais do solo, à medida que o fertilizante fosfatado migra para fora do grânulo (SOUSA; VOLKWEISS, 1987). Isso resulta na menor mobilidade e disponibilidade de P para as plantas em função deste elemento passar para formas menos lábeis (ALMEIDA; ROSOLÉM, 2016).

Para fontes solúveis, a recomendação é que o P seja aplicado de forma localizada, em menor volume de solo, para aumentar a eficiência de uso do nutriente (BORKERT; BARBER, 1985), principalmente em solos com média a alta capacidade de adsorção. Este é o método tradicionalmente adotado para fornecer P para a cana-de-açúcar. A diminuição do volume de solo em contato com o fertilizante estimula as raízes a se concentrarem na região fertilizada, promovendo alterações na sua morfologia, como diminuição do raio radicular e aumento do comprimento das raízes, para aumentar o influxo de P por superfície de área de raiz e compensar a menor área de absorção de P pelas raízes (ANGHINONI; BARBER, 1980). Para fontes de baixa solubilidade, como os fosfatos naturais, a recomendação é que estes devam ser moídos e completamente misturados com o solo (GOPALASUNDARAM; BHASKARAN; RAKKIYAPPAN, 2012) para aumentar a área de contato com os componentes ácidos do solo e permitir a dissolução e liberação do P dessas fontes.

Nas últimas décadas, tem-se aumentado a preocupação com a segurança alimentar global em virtude do crescimento populacional. A garantia da produção de alimentos em escala global para atender a essa demanda depende do uso de fertilizantes, principalmente nitrogenados e fosfatados. A intensificação do uso desse recurso, principalmente pelos países desenvolvidos, provocou diminuição da qualidade das reservas fosfáticas exploradas atualmente e fez elevar os preços desse recurso (CORDELL; NESET, 2014). Cabe ressaltar que o fosfato de rocha é um recurso natural finito e não renovável e estima-se que as reservas devam se esgotar em até 300 anos se mantida a demanda atual. A diminuição da qualidade dos fosfatos de rochas em função do aumento das impurezas, principalmente Fe e Al diminui a solubilidade em água de fontes solúveis, a exemplo do superfosfato triplo. Pesquisadores do Brasil e do mundo vêm desenvolvendo trabalhos para avaliar o potencial de uso pelas plantas do P insolúvel dessas fontes (MULLINS et al., 1990; PROCHNOW; KIEHL; RAIJ, 1998; JOHNSTON; RICHARDS, 2003). Outros trabalhos têm sido conduzidos para mostrar o potencial para aplicação direta dos fosfatos naturais reativos (FNR); em mistura com fosfato solúvel ou associado com fontes orgânicas (GIKONYO et al., 2010; WANG et al., 2014; SAVINI et al., 2016) e mostram que fonte menos solúveis (FNR) apresentam eficiência similar aos fosfatos solúveis.

Na cultura da cana-de-açúcar, resultados comprovam que o FNR de Gafsa foi tão efetivo quanto os fosfatos altamente solúveis quando aplicado no sulco de plantio para cana planta (SANTOS et al., 2009) ou em área total para três ciclos de cultivos (REIN; SOUSA, 2013). Em virtude do P prontamente disponível das fontes solúveis formarem compostos de baixa disponibilidade, diminuem seu efeito residual ao longo do tempo (KORNDÖRFER; MELO, 2009) enquanto que para o FNR a liberação do P ocorre de forma gradual, ao longo do tempo após sua aplicação, diminuindo a sua adsorção pelos constituintes do solo (RAJAN; WATKINSON; SINCLAIR, 1996). Em função disso, nossa hipótese do trabalho é que a aplicação direta de FNR pode ser uma alternativa promissora em substituição aos fosfatos solúveis, de maior custo, para fornecer P em quantidades adequadas para a produção da cana-de-açúcar, em áreas tradicionalmente estabelecidas e em áreas de expansão, em função da solubilização parcial do P ao longo dos ciclos de cultivo.

Com este trabalho, objetivamos obter melhor embasamento sobre o manejo de fontes de P solúvel e reativa, bem como seus modos de aplicação em solos com propriedades físico-químicas distintas, na busca de maior eficiência do fertilizante em áreas tradicionalmente cultivadas com cana-de-açúcar e em áreas de expansão, antes ocupadas com pastagem.

2.2. Material e métodos

2.2.1. Caracterização das áreas experimentais

Foram conduzidos dois experimentos de campo em áreas de cultivo comercial de cana-de-açúcar pertencentes a fornecedores de matéria prima para a Usina Barra Grande, do grupo Zilor, localizada em Lençóis Paulista-SP. Para a escolha das áreas, levou-se em consideração os baixos teores de P no solo pelo extrator resina e texturas contrastantes; um solo arenoso de baixa capacidade de adsorção e outro muito argiloso, com alta capacidade de adsorção de fosfato.

A área experimental 1 está localizada na fazenda Glória, município de Agudos, sob as coordenadas geográficas 22°33'22" S, 49°06'15" W, 715 m de altitude e a área experimental 2 está localizada na fazenda Pouso Alegre, município de Macatuba, sob as coordenadas geográficas 22°29'39" S, 48°41'14" W, 515 m de altitude (Figura 1), ambas localizadas no Estado de São Paulo.

O experimento de Agudos foi implantado em agosto de 2013 e o de Macatuba em março de 2014. O motivo da não implantação da segunda área em 2013 foi decorrente da dificuldade inicial em encontrar área disponível com baixo P e teor de argila alto, contrastando ao solo arenoso de Agudos.

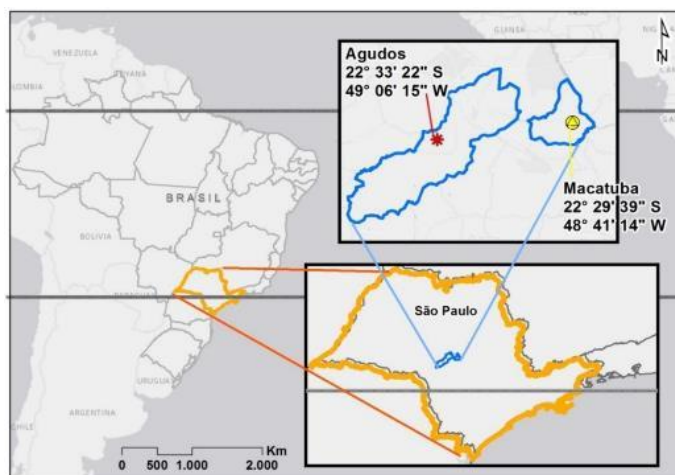


Figura 1. Localização geográfica dos experimentos de campo, no Estado de São Paulo, Brasil.

O solo da área experimental 1 (Agudos) apresenta textura franco arenosa e foi classificado como Latossolo Vermelho Amarelo distrófico (EMBRAPA, 2013). Esta área é classificada como ambiente E1 para a produção de cana-de-açúcar com potencial de água disponível baixo, baixa CTC e solo distrófico. Os dados de precipitação pluviométrica no período experimental encontram-se na figura 2.

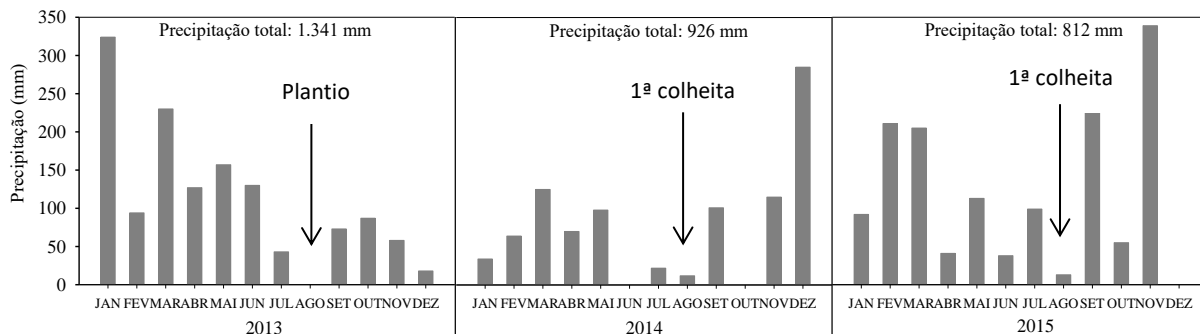


Figura 2. Precipitação pluviométrica no período de 2013 a 2015 no experimento de agudo, SP, Brasil.

A área vinha sendo cultivada com pastagem por um período de tempo superior a 20 anos após a abertura do cerrado nativo. A mudança no uso da terra ocorreu no ano de 2013, com a conversão da pastagem para canavial pelo processo de expansão da cana-de-açúcar em função da alta demanda nacional e global por bioenergia. A área foi dessecada com a aplicação de 4 L ha^{-1} de glifosato para eliminação da pastagem existente no local.

Os atributos químicos, mineralógicos e as frações granulométricas do solo são apresentados na figura 3 e tabela 1.

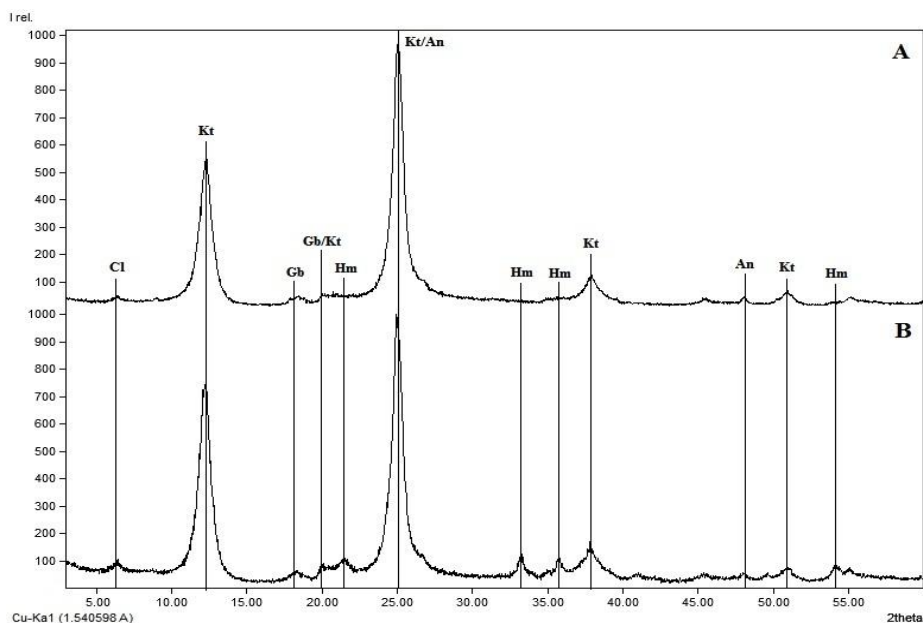


Figura 3. Difratogramas de raios-X da fração argila tratada com DCB (A) e sem tratamento (B) de amostra de solo da camada de 0-20 cm em Agudos-SP. An: anatásio, Cl: clorita, Gb: gibbsita, Hm: hematita, Kt: caulinita.

Após a eliminação da pastagem e antes da instalação do experimento, foi feita a calagem, aplicando-se $3,5 \text{ t ha}^{-1}$ de calcário (PRNT de 90%) baseado em uma correção para vários ciclos da cana, conforme realizado nas áreas adjacentes pelo produtor. Realizou-se a gessagem com a aplicação de $2,5 \text{ t ha}^{-1}$ de gesso. Tanto a calagem como a gessagem foram

feitas de forma mecanizada em área total e incorporadas com grade aradora em duas passadas, com incorporação em torno de 20 cm.

O solo da área experimental 2 (Macatuba-SP) foi classificado como Latossolo Vermelho Eutrófico (EMBRAPA, 2013) de textura muito argilosa. A precipitação pluviométrica no período experimental, os atributos químicos, mineralógicos e as frações granulométricas do solo encontram-se nas figura 4 e 5 e na tabela 1. A área vem sendo cultivada com cana-de-açúcar a cerca de 50 anos, sendo os experimentos estabelecidos em área de reforma de canavial. O preparo da área teve início com a aplicação separadamente de calcário e gesso, nas dosagens de $3,5 \text{ t ha}^{-1}$ de calcário e $2,0 \text{ t ha}^{-1}$ de gesso.

A área foi dessecada com a aplicação de 6 L ha^{-1} de glifosato para a eliminação das plantas remanescentes do último ciclo de cultivo da cana-de-açúcar. Cerca de 30 dias após, fez-se a eliminação da soqueira utilizando-se um conjunto trator-eliminador de soqueira. Na etapa subsequente fez-se o revolvimento do solo com uma única passada com uma grade de porte médio.

Tabela 1. Atributos químicos, mineralógicos e frações granulométricas dos solos das duas áreas de avaliação, Agudos e Macatuba-SP.

Camada	pH	CaCl ₂	MO	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	CTC	V	m	Granulometria			DCB		Oxalato		CMAP
														AR	SIL	ARG	Fe _d	Al _d	Fe _o	Al _o	
Agudos – solo arenoso																					
cm			g kg ⁻¹	mg dm ⁻³	mmol _c dm ⁻³							%		g kg ⁻¹				mg kg ⁻¹			
0-10	4,3	14,3	4	1,5	7,0	5	2	25	13,2	38,1	35	11									
10-20	4,2	10,7	3	1,7	5,0	3	3	28	10,3	38,0	27	21									
0-20														884	4	112	15,3	42,3	0,6	1,4	342
20-40	3,9		3	1,9	3,0	2	6	38	6,8	44,8	15	48	835	27	138						
40-60	4,0		2	0,8	2,8	0,8	7	34	4,3	38,5	11	63	832	17	151						
60-80	3,9		1	0,7	2,8	0,9	9	31	3,8	34,6	11	70	825	24	151						
Macatuba – solo muito argiloso																					
0-10	5,6	31,0	11	1,9	54	25	0,9	22	80,9	103	79	1									
10-20	5,3	28,5	9	1,7	44	22	0,9	28	67,7	96	71	1									
0-20														219	152	629	110,9	53,4	4,4	1,1	1557
20-40	5,2		8	1,2	30	12	0,9	25	43,2	68	63	2	211	122	667						
40-60	5,1		5	0,7	23	9	2	25	32,7	58	57	6									
60-80	4,9		3	0,5	27	13	2	34	40,5	74	54	5									

MO = matéria orgânica, SB = soma de bases, CTC = capacidade de troca de cátions, V = saturação por base; m = saturação por alumínio. AR = areia; SIL = silte; ARG = argila; DCB = ditionito citrato bicarbonato de sódio (Mehra e Jackson, 1960), Fed, Ald = Fe e Al ditionito, Feo, Alo = Fe e Al oxalato. CMAP = capacidade de máxima sorção de P. pH do solo foi determinado relação 1:2,5 CaCl₂ 0,01 M, P, K, Ca e Mg extraídos com resina trocadora de íons (Raij; Quaggio; Silva, 1986), sendo o fósforo determinado pelo método colorimétrico fosfomolibdato de Murphy e Riley (1962), potássio por fotometria de chama e cálcio e magnésio por espectrofotometria de absorção atômica. O alumínio trocável foi extraído com solução de cloreto de potássio 1 M e a acidez potencial (H+Al) determinada com a solução tampão SMP (RAIJ et al., 2001).

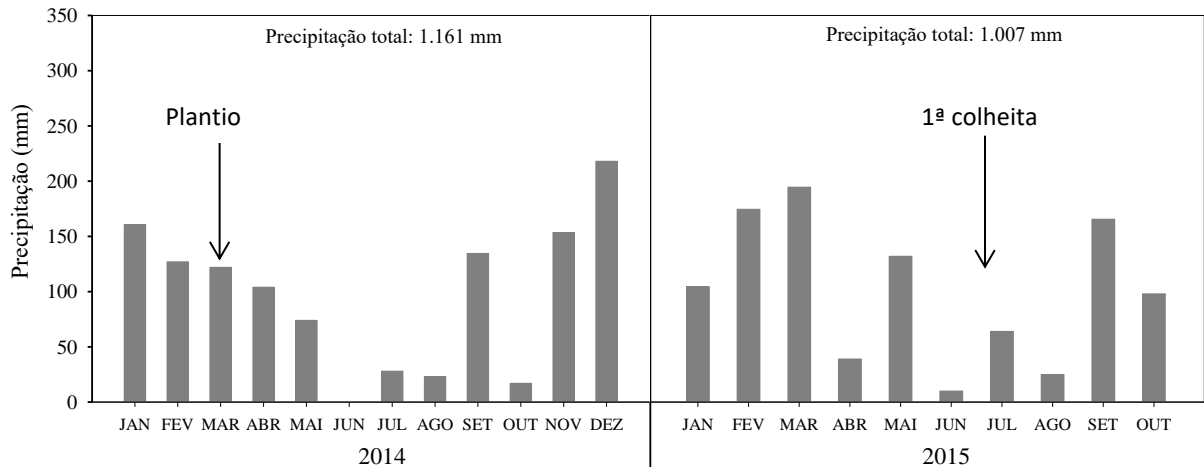


Figura 4. Precipitação pluviométrica no período de 2014 a 2015 no experimento de Macatuba, SP, Brasil.

Prosseguiu-se com uma subsolagem com trator equipado com sistema GPS e subsolador de duas hastes, na profundidade de 60 cm por 70 cm de largura, formando uma espécie de canteiro na linha de sulcamento e, em seguida, utilizou-se uma grade niveladora para fazer o destorroamento do solo.

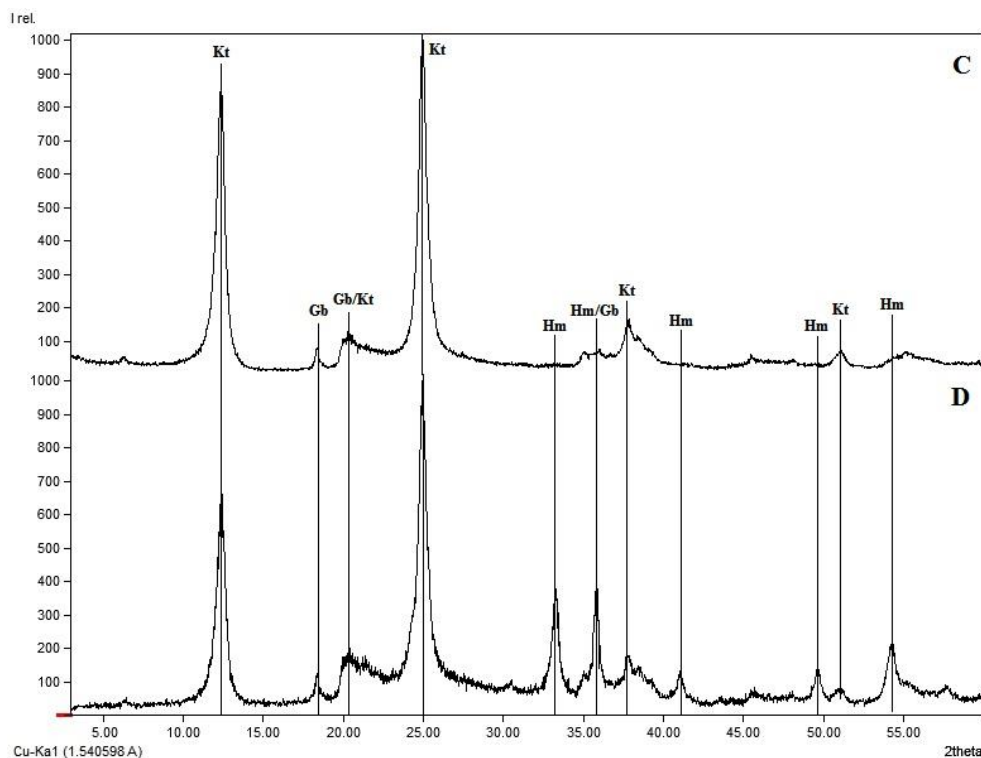


Figura 5. Difratogramas de raios-X da fração argila tratada com DCB (C) e sem tratamento (D) de amostra de solo da camada 0-20 cm em Macatuba-SP. Gb: gibbsita, Hm: hematita, Kt: caulinita.

A coleta de amostra de solo inicial em Macatuba foi feita cerca de 30 dias após a aplicação de calcário e gesso, em função do produtor ter feito essa operação com antecedência da definição de implantação do experimento. Por isso observa-se valores de CTC e V% mais elevados, principalmente nas camadas mais superficiais, em virtude do aumento dos teores de

Ca e Mg do calcário e do gesso, sendo que a CTC é determinada pelo método indireto por meio da soma dos cátions Ca, Mg e K. Os experimentos nesta área 2 foram estabelecidos em março de 2014.

De acordo com dados de análise inicial do solo (Tabela 1), para a área 1 os teores de P disponível no solo são classificados como muito baixo e para a área 2 os teores de P são qualificados como baixo na camada de 0-20 cm, de acordo com o boletim 100 (RAIJ et al., 1997).

2.2.2 Implantação e condução dos experimentos

O experimento em Agudos foi implantado em agosto de 2013. Após o preparo do solo, iniciou-se com a distribuição dos fertilizantes fosfatados primeiramente na forma de aplicação a lanço em área total, com a incorporação dos mesmos a cerca de 10 a 15 cm de profundidade utilizando-se um conjunto trator-grade niveladora. Na sequência, foi feita uma subsolagem direcional na profundidade de 80 cm na linha de sulcamento, com um trator equipado com GPS. Seguiu-se com a abertura dos sulcos e a distribuição dos tratamentos com fósforo na forma de aplicação no fundo do sulco, em suas respectivas parcelas. A adubação de fundação com nitrogênio e potássio foi feita na dosagem de 60 kg ha⁻¹ de N e 150 kg ha⁻¹ de K₂O, na forma de ureia e cloreto de potássio, respectivamente.

O plantio foi feito no sistema de cana de ano, distribuindo-se dois colmos paralelos no fundo do sulco no sentido pé com ponta. Os colmos foram cortados manualmente com facão em pedaços contendo de 3 a 4 gemas, totalizando de 18 a 20 gemas por metro de sulco (Figura 6).



Figura 6. Toletes de cana distribuídos no sulco de plantio, fazenda Glória, Agudos-SP.

Para se chegar a esse número de gemas por metro, foi feita antes a calibração em uma parcela, contando-se o número de gemas em cada uma das linhas da parcela. A distribuição dos colmos (toletes) foi feita manualmente. Após a distribuição dos toletes nos sulcos, foi feita a cobertura dos toletes com 10 a 15 cm de terra e na mesma operação o tratamento dos colmos com inseticida, nematicida e fungicida, por meio de um trator equipado com um tanque reservatório de defensivo e cobridor de discos.

A variedade utilizada foi a RB86-7515 no espaçamento de 1,5 m entre linhas. Essa variedade é a mais cultivada nas unidades industriais produtoras de cana-de-açúcar da região Centro-Sul, respondendo por mais de 27% da área de cultivo (UFSCar, 2016). Ela possui desenvolvimento rápido com hábito de crescimento ereto e destaca-se pelo seu alto teor de sacarose e alta produtividade agrícola, com boa brotação. Sendo assim, é recomendada para cultivo em ambientes de média fertilidade natural, com excelente desempenho em solos de textura arenosa. É uma variedade com maturação de média a tardia, devendo ser colhida em meados de julho até setembro. Por ser responsiva a maturador, pode ser colhida também em início de safra com o uso dessa tecnologia (RIDESA, 2010).

Para a segunda área, Macatuba, o plantio foi feito no sistema de cana de ano e meio. Com exceção dos colmos para o plantio, que foram colhidos de forma mecanizada em pedaços prontos para serem distribuídos nos sulcos de plantio, a abertura dos sulcos e distribuição dos tratamentos bem como as etapas de distribuição, tratamento químico e cobertura dos toletes no sulco de plantio (Figura 7) seguiram os mesmos procedimentos da área experimental 1 (Agudos).



Figura 7. Vista geral da distribuição dos toletes da variedade de cana CTC-16 no sulco de plantio, fazenda Pouso Alegre, Macatuba-SP.

A adubação de plantio foi complementada com a aplicação de 500 kg ha^{-1} da fórmula 18-00-27, equivalente a 90 kg ha^{-1} de N e 135 kg ha^{-1} de K_2O , utilizando ureia e cloreto de potássio, respectivamente.

A variedade utilizada, nesta segunda área, foi a CTC-16, no espaçamento de 1,5 m entre linhas. Esta variedade apresenta como destaque sua precocidade, alto teor de sacarose, produtividade e rápido fechamento. Possui longo período útil de industrialização, podendo ser colhida até o meio da safra. Apta ao plantio e colheita mecanizada, com bom perfilhamento e brotação de soqueira. É recomendada para ambientes de alto a médio potencial produtivo (A, B e C), com solo de boa fertilidade e alta retenção de água (CTC, 2013).

Após a instalação dos experimentos o controle de ervas daninhas e de pragas, foi feito pelos produtores nos mesmos moldes que é realizado nas áreas comerciais adjacentes.

Para o manejo da soqueira, o qual foi realizado somente em Agudos em 2014, a adubação de cobertura na primeira soca (2º ano) foi feita em outubro, com aplicação de 560 kg ha^{-1} da fórmula 16-00-16 distribuída em calda de 440 L ha^{-1} , totalizando 90 kg ha^{-1} de N e 90 kg ha^{-1} de K_2O . Utilizou-se o uran como fonte de N e o cloreto de potássio como fonte de K. A operação foi feita com um trator equipado com um tanque reservatório para a distribuição do adubo líquido e um cultivador de duas linhas. O experimento de Macatuba não foi avaliado a soqueira em função de ter sido implantado somente no ano de 2014.

2.2.3 Tratamentos

Os tratamentos foram compostos de fontes de fósforo x modos de aplicação. As fontes utilizadas foram superfosfato triplo e fosfato reativo (Gafsa-Agudos e Bayóvar-Macatuba) na dose de 180 kg ha^{-1} de P_2O_5 solúvel em citrato neutro de amônio + água ($\text{CNA} + \text{H}_2\text{O}$) para a fonte solúvel e ácido cítrico (AC) a 2% para os FNRs. O fertilizante foi distribuído no momento do plantio em três modos de aplicação: i) 100% distribuído a lanço e incorporado, ii) 50% distribuído a lanço + 50% distribuído no sulco e iii) 100% distribuído no sulco de plantio (Tabela 2). Todos os tratamentos foram aplicados no estabelecimento da cultura. As percentagens de P_2O_5 total, solúvel em $\text{CNA} + \text{H}_2\text{O}$ e em AC de cada fonte utilizada encontram-se na tabela 3.

Tabela 2. Tratamentos aplicados na ocasião da implantação dos experimentos nos dois locais de avaliação, Agudos e Macatuba.

Tratamento	Fonte	Forma de aplicação
1	Fosfato Solúvel (Super triplo)	100% Lanço
2		50% Lanço + 50% Sulco
3		100% Sulco
4	Fosfato Reativo (Gafsa ou Bayóvar)	100% Lanço
5		50% Lanço + 50% Sulco
6		100% Sulco
7	Controle	Sem aplicação de fósforo

Tabela 3. Concentração de fósforo total e solúvel nas fontes utilizadas no experimento.

Fonte	Fósforo (P ₂ O ₅)		
	Total	CNA+H ₂ O	AC 2% (1:100)
	-----%-----		
Super triplo	47,5	46,9	-
Gafsa	28,5	4,2	9,6
Bayóvar	28,9	6,5	14,8

2.2.4 Delineamento experimental

O delineamento adotado foi em blocos ao acaso no esquema de parcelas subdivididas com sete tratamentos e três repetições. As parcelas principais foram constituídas das fontes de fósforo acrescido de um tratamento controle. Nas subparcelas, foram distribuídos os tratamentos secundários referente aos modos de aplicação. Cada sub-parcela foi constituída de 6 linhas de 10 m cada, no espaçamento de 1,5 m, perfazendo 90 m² de área total. As parcelas foram constituídas de 3 x 90 m², totalizando 270 m² cada.

2.2.5 Avaliações realizadas

As avaliações realizadas no campo foram referentes à cana planta e 1^a soca para o experimento em Agudos (safra 2014 e 2015) e apenas para cana planta (safra 2015) no experimento de Macatuba.

a) *Biometria*

Foi realizada a contagem do número de colmos por metro linear, amostrando-se cinco metros em duas linhas centrais, totalizando dez metros por parcela para Agudos e apenas 5 m para o experimento de Macatuba. A estimativa da quantidade de colmos por hectare foi obtida pela média do número de colmos por metro multiplicada por 6.667, que representa a quantidade em metros de sulco por hectare no espaçamento de 1,5 m entre linhas.

A avaliação biométrica foi feita com base na metodologia descrita por Sundara (1994): no experimento de Macatuba em virtude da despalha natural das folhas secas da variedade CTC 16, foram colhidas todas as plantas contidas em 1 m de sulco e para a área de Agudos foram amostradas dez plantas representativas por parcela, separadas em colmo, folha seca e ponteiro (Figura 8).

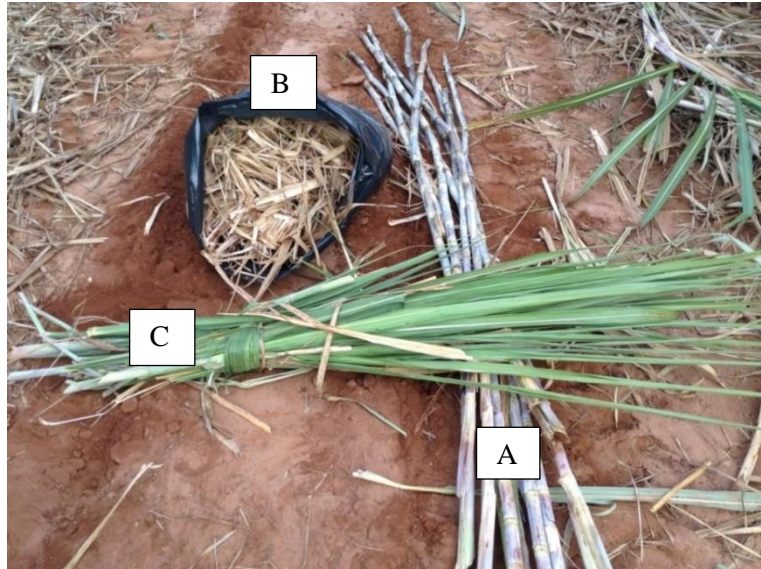


Figura 8. Separação das partes das plantas amostradas para biometria. Colmo (A), folha seca (B) e ponteiro (C).

A massa úmida de cada uma das partes foi mensurada individualmente e somadas para a obtenção da massa total. Dez ponteiros e quatro colmos das plantas colhidas foram triturados em uma máquina picadora de forragem (Figura 9) para obtenção de subamostras frescas.



Figura 9. Máquina picadora e acessórios, utilizados para a obtenção de subamostras da parte aérea da cana-de-açúcar para determinação da extração de nutrientes.

As subamostras frescas da folha seca foram formadas por seis folhas por parcela. As subamostras de tecido tiveram suas massas mensuradas e colocadas para secar em estufa de circulação de ar a 60° C até atingir massa constante. Após o processo de secagem, cada parte teve sua massa seca mensurada, em seguida foram moídas em moinho de facas tipo Willey e acondicionadas em sacos plásticos para posterior análise laboratorial.

A massa seca das dez plantas amostradas (Agudos) ou de 1 m de linha (Macatuba) foi estimada a partir da massa seca das subamostras. A massa seca em tonelada por hectare para cada parte foi estimada utilizando-se a massa seca da subamostra e o número de plantas por hectare. A massa seca total foi obtida com a soma da massa seca das partes individuais.

b) Produtividade agrícola

A colheita da área útil de cada parcela foi realizada manualmente, com a colaboração dos funcionários de campo das empresas que operam as áreas de produção das fazendas. A mensuração da produtividade de colmos foi feita utilizando-se um dinamômetro digital e um conjunto de cintas, acoplados em uma máquina carregadeira de cana (Figura 10).



Figura 10. Pesagem dos colmos total industrializáveis das parcelas, fazenda Glória, Agudos-SP. 2014.

Considerou-se como área útil de cada parcela as quatro linhas centrais. Em Agudos, no ano de 2015, colheu-se apenas as três linhas centrais em função da diminuição da mão-de-obra disponível para tal fim. A massa obtida pelos dez colmos (Agudos) ou 1 m de linha (Macatuba) utilizados na avaliação biométrica foram acrescentadas a massa da área útil colhida das parcelas para estimar o rendimento de colmo industrializáveis por hectare.

c) *Extração de nutrientes no tecido*

A digestão do tecido das amostras de planta (colmo, ponteiro e folhas secas) e a determinação das quantidades de P extraído pela parte aérea da cana-de-açúcar foi realizada de acordo com a metodologia proposta por Richards (1993), pesando-se 0,25 g de massa seca e adicionando-se 2,5 mL da mistura nitro-perclórica (HNO₃:HClO₄, 5:1) em tubo de digestão de 50 mL. A mistura amostra-solução digestora ficou em pré-digestão durante uma noite. No dia seguinte foi colocada em bloco digestor para completar a digestão, começando em temperatura ambiente, aumentando 50 °C a cada 30 minutos até atingir 210 °C. Após a completa digestão, quando o extrato se apresentava com coloração clara, os tubos foram retirados do bloco digestor para resfriamento. Após, o volume foi completado para 25 mL.

As concentrações de P foram determinadas pelo método colorimétrico fosfovanadomolibdato em espectrofotômetro Femto 600 plus, no comprimento de onda de 420 nm, isso para o ano de 2014. Em 2015, as determinações de P no extrato foram feitas por espectrometria de emissão atômica em plasma indutivamente acoplado (ICP-OES, modelo iCAP 6300 Duo Thermo Scientific) após a digestão nitro-perclórica (HNO₃:HClO₄, 5:1) (Richards, 1993).

d) *Análise tecnológica*

Foi utilizada uma amostra composta de seis colmos (àqueles coletados na biometria mas não triturados) para a determinação em laboratório do brix, pol, pureza, fibra, açúcar redutor (AR) e açúcar total recuperável (ATR), adotando metodologia da Consecana (2006). Com os dados da pol (percentagem de sacarose da cana) e do ATR (kg t⁻¹ de cana moída) calculou-se a quantidade toneladas de Pol produzida por hectare (TPH) e o açúcar total recuperável por meio das seguintes fórmulas:

$$\text{TPH (t ha}^{-1}\text{)} = \text{Pol (\%)} \times \text{Rendimento (t ha}^{-1}\text{)} / 100 \quad (1)$$

$$\text{ATR (t ha}^{-1}\text{)} = \text{ATR (kg t colmo}^{-1}\text{ moído)} \times \text{Rendimento (t ha}^{-1}\text{)} / 1000 \quad (2)$$

e) *Alterações químicas do solo após cada colheita*

No período da colheita, realizada em agosto de 2014 e agosto de 2015 para o experimento de Agudos e em julho de 2015 para o experimento de Macatuba, foram feitas coletas de amostras de solo para análise química e para o fracionamento do P do solo. A amostragem foi realizada sobre a linha de plantio, nas profundidades de 0-10, 10-20 e 20-40 cm, com quatro amostras simples para formar uma amostra composta em cada parcela. Foram

consideradas como área útil da parcela as quatro linhas centrais, retirando-se uma subamostra em cada linha nas respectivas profundidades. As amostras foram secas ao ar e, após, passadas em moinho de solo com peneira de 2 mm de diâmetro, sendo acondicionadas em sacos de polietileno até serem analisadas em laboratório.

f) Fracionamento de fósforo

O fracionamento de fósforo do solo foi realizado de acordo com metodologia proposta por Hedley, Stewart e Chauhan (1982), com modificações feitas por Condon, Goh e Newman (1985). Foi utilizado 0,5 g de solo submetido a diferentes extratores em ordem sequencial: a) resina de troca aniônica (RTA) de 2 cm² saturada com bicarbonato mede o P biologicamente disponível (HEDLEY; STEWART; CHAUHAN, 1982) e NaHCO₃ 0,5 mol L⁻¹ extrai o lábil Pi e Po sorvido na superfície do solo mais uma pequena quantidade do P microbiano (BOWMAN; COLE, 1978 (frações inorgânica e orgânica lábeis), NaOH 0,1 mol L⁻¹ extrai compostos de Pi e Po retidos mais fortemente por quimiossorção às superfícies dos óxidos de Fe e Al do solo e HCl 1,0 mol L⁻¹ (frações inorgânica e orgânica moderadamente lábeis) e NaOH 0,5 mol L⁻¹ (frações inorgânica e orgânica não lábeis) extrai Pi e Po retido na superfície interna dos agregados do solo.

Todas as extrações passaram por um período de 16 horas de agitação, em agitador orbital tipo Wagner a 33 rpm. No final da sequência de extrações, as amostras foram colocadas para secar a 50 °C em estufa de circulação de ar durante quatro dias. Após a secagem, foram moídas para homogeneizar as frações argila, silte e areia e prosseguiu-se a extração do P residual por digestão com ácido sulfúrico (H₂SO₄) concentrado e peróxido de hidrogênio (H₂O₂) a 30% e cloreto de magnésio saturado (fração residual) (BROOKES; POWLSON, 1981). O P-residual é composto de formas de Po quimicamente estáveis e por formas insolúveis de Pi, retidas com alta energia.

As leituras do teor de P nos extratos foram feitas em espectrofotômetro de absorção, seguindo a metodologia de Murphy e Riley (1962) para os extratos ácidos e Dick e Tabatabai (1977) para os extratos alcalinos. As frações orgânicas foram estimadas pela diferença entre as frações totais, que foi determinada após a digestão dos extratos alcalinos com solução de persulfato de amônio a 7,5% (m/v) e ácido sulfúrico a 50% e autoclavadas a 121 °C e 103 kPa durante 2 horas (USEPA, 1971) e a fração inorgânica. As frações inorgânicas foram determinadas diretamente no extrato obtido após as 16 horas de agitação com o respectivo extrator. Todas as leituras foram feitas em espectrofotômetro Femto 600 plus.

g) *Capacidade máxima de adsorção de fósforo*

A capacidade de máxima adsorção de fósforo do solo (CMAP) foi determinada em amostras coletadas da camada 0-20 cm e seguiu-se a metodologia de Sui e Thompson (2000), utilizado-se 2 g de solo seco < 2 mm em triplicata para cada solo. As amostras de solo foram colocadas em tubos falcon de 50 mL e misturadas com 20 mL de 13 diferentes soluções equivalente a adição de 0, 5, 10, 20, 40, 60, 80, 120, 200, 280, 360, 440, 520 mg de P kg⁻¹ de solo. A solução foi preparada com a dissolução de KH₂PO₄ (fosfato monobásico de potássio) em 0,01 M de CaCl₂. Os tubos foram colocados para agitação por um período de 48 h na temperatura constante de 25 °C. Após esse tempo, os tubos foram centrifugados em 2500 rpm a 1281 g por 10 minutos. O P do sobrenadante foi determinado pelo método de Murphy e Riley (1962). A adsorção de P foi modelada pela equação de curva de sorção por meio do modelo de Langmuir.

h) *Eficiência agronômica do fósforo*

A eficiência agronômica do P utilizado via fertilização foi calculada pela metodologia proposta por Fageria e Baligar (2008) por meio do método da diferença. De acordo com esses autores a eficiência agronômica (EA) é definida como a produção econômica obtida por unidade de nutriente aplicado. No caso da cana-de-açúcar essa medida pode ser obtida a partir da produção de colmo, da Pol e do açúcar total recuperável (ATR) como segue:

$$EA_{\text{Colmo}} (\text{kg kg}^{-1}) = [(\text{Prod}_{\text{Colmo}} \text{ fert} - \text{Prod}_{\text{Colmo}} \text{ Controle}) / (\text{P aplicado})] \quad (3)$$

$$EA_{\text{ATR}} (\text{kg kg}^{-1}) = [(\text{Prod}_{\text{ATR}} \text{ fert} - \text{Prod}_{\text{ATR}} \text{ Controle}) / (\text{P aplicado})] \quad (4)$$

$$EA_{\text{TPH}} (\text{kg kg}^{-1}) = [(\text{Prod}_{\text{TPH}} \text{ fert} - \text{Prod}_{\text{TPH}} \text{ Controle}) / (\text{P aplicado})] \quad (5)$$

onde: EA_{Colmo}, EA_{TPH} e EA_{ATR} = eficiência agronômica do colmo, TPH e ATR, respectivamente, Prod_{Colmo} fert, Prod_{TPH} fert e Prod_{ATR} fert = produção de colmo, de TPH ou de ATR no tratamento que recebeu fertilizante, Prod_{Colmo} Controle, Prod_{TPH} Controle e Prod_{ATR} Controle = produção de colmo, Pol ou ATR no tratamento sem aplicação de fertilizante.

A eficiência de recuperação aparente ou de aproveitamento do P aplicado (EAPA) é definida como a quantidade total do nutriente extraído pela quantidade de nutriente aplicado e pode ser obtida pela fórmula:

$$EAPA (\%) = 100 [(P_{\text{abs}}^{\text{fert}} - P_{\text{abs}}^{\text{Cont}}) / (\text{P aplicado})] \quad (6)$$

onde $P_{\text{absfert}} = P$ total absorvido pela parte aérea da planta no tratamento fertilizado e $P_{\text{absControle}} = P$ total absorvido pela parte aérea da planta no tratamento sem fertilizante.

2.2.6 Procedimentos estatísticos

Antes da análise de variância os dados foram checados para verificar a homogeneidade de variância, normalidade, pontos discrepantes (outliers), tamanho da amostra e escala das variáveis resposta. Quando alguma das pressuposições não foram atendidas buscou-se a transformação dos dados utilizando-se o procedimento potência ótimo (Anexo 2A) de Box e Cox (1964) e em seguida os dados foram submetidos a análise de variância (ANOVA), utilizando-se o procedimento modelo linear geral (GLM) para testar o efeito das fontes e dos modos de aplicação da adubação fosfatada no rendimento agrícola e industrial da cana-de-açúcar e nas frações de P do solo.

Quando significativas, as médias dos tratamentos foram comparadas pelo teste t (LSD) ($p \leq 0,05$) para cada fator de forma individualizada ou isolada. As comparações múltiplas das interações foram realizadas pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). As comparações entre os tratamentos testados e o controle foram realizadas por meio de contrastes. A comparação das médias das interações com o tratamento controle foram feitas pelo teste de Dunnett ($p \leq 0,05$). Todos os procedimentos estatísticos foram feitos com o auxílio do programa estatístico SAS versão 9.3 (SAS, 2010). O teste de Dunnett não necessita de letra para especificar diferenças porque ele compara um tratamento fixo com os demais.

2.3 Resultados e discussão

2.3.1 Rendimento e extração de P

No ciclo de cana planta não houve efeito das fontes e dos modos de aplicação da adubação fosfatada no número de planta por metro, rendimento de ATR e TPH (industrial), produtividade de colmos industrializáveis e nem na produção de massa seca das variedades RB86-7515 em Agudos (2014) e CTC-16 em Macatuba (2015) (Tabela 4). Tem sido observado que as características industriais da cana-de-açúcar brix, pureza e pol são pouco afetadas pela adição de fertilizantes no ciclo de cana planta (BOKHTIAR; SAKURAI, 2005; TSADO et al., 2013). Em área de expansão da cana-de-açúcar, como a de Agudos, com solo de baixa fertilidade e com teores de P muito baixo (Tabela 1) era de se esperar que a produtividade fosse influenciada pela adição de fosfato.

Tabela 4. Médias dos rendimentos agrícola e industrial, massa seca e extração de P pela cana-de-açúcar em fontes e formas de aplicação da adubação fosfatada nas safras 2014 e 2015 em Agudos e 2015 em Macatuba.

Tratamento	Agudos 2014												
	NPm	ATR	TPH	Prod	Fol	Col	Pon	Tot	PFol	PCol	PPon	PTot	
Controle (C)	7,2	15,6	18,4	110,2	7,2	28,9	3,7	39,8	1,3	5,7	3,9	10,9	
Fonte (F)	ST	7,4	17,1	20,1	124,1	7,8	28,6	4,3	40,7	2,1	7,4	4,7	14,2a
	FNR	7,1	16,0	18,9	115,2	6,9	27,1	3,8	37,7	1,6	6,4	4,0	12,0b
Modo (M)	Lanço	7,6	16,2	19,0	119,0	7,6	29,2	4,3	41,1	1,9	8,5a	4,7	15,2a
	50/50	7,1	16,6	19,7	119,3	7,5	27,6	3,8	38,9	2,1	6,4b	4,1	12,7ab
	Sulco	7,1	16,9	19,8	120,6	7,0	26,6	4,1	37,7	1,5	5,8b	4,3	11,6b
Significância do teste F													
F		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	
M		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**	*	ns	*	
FxM		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns	
CV%		11	8	7	8	14	18	16	16	14	18	16	15
Contrastes													
C vs demais		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns	
C vs ST		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**	ns	ns	ns	
C vs FNR		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	
C vs lanço		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	*	ns	*	
C vs 50/50		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**	ns	ns	ns	
C vs sulco		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	
Agudos 2015													
Controle (C)		8,4	17,6	20,7	119,4	7,1	27,5	4,3	38,8	1,3	7,2	4,4	13,0
Fonte (F)	ST	9,6	20,6	24,4	139,8	9,3	34,5	5,0	48,8	1,9	12,9	6,1	20,9
	FNR	9,1	19,9	23,5	135,2	8,2	30,3	4,4	43,0	1,7	12,0	5,2	18,9
Modo (M)	Lanço	9,6	20,3	24,1	137,3	8,3	32,5	4,5	45,3	1,7ab	13,5	5,4	20,6
	50/50	9,5	20,7	24,5	140,8	9,8	34,0	5,1	48,8	2,2a	12,8	6,2	21,2
	Sulco	9,0	19,7	23,3	134,5	8,3	30,8	4,5	43,6	1,5b	11,1	5,3	17,9
F		ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	**	ns	**	Ns	*
M		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	Ns	ns
FxM		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	Ns	ns
CV%		14	8	8	9	24	21	20	20	24	20	20	19
C vs demais		ns	*	**	*	ns	ns	ns	ns	*	**	ns	**
C vs ST		ns	**	**	*	ns	ns	ns	ns	*	**	*	**
C vs FNR		ns	*	*	*	ns	ns	ns	ns	ns	**	ns	*
C vs lanço		ns	*	**	*	ns	ns	ns	ns	ns	**	ns	**
C vs 50/50		ns	**	**	*	ns	ns	ns	ns	**	**	*	**
C vs sulco		ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns
Macatuba 2015													
Controle (C)		11,1	22,2	26,7	157,3	16,4	34,6	5,2	56,2	3,0	14,2	4,4	21,5
Fonte (F)	ST	11,4	23,2	27,7	163,0	14,8	37,1	6,2	58,0	2,6	15,6	5,5	23,7
	FNR	11,3	23,4	28,2	162,2	14,4	36,0	5,9	56,3	2,7	15,4	5,3	23,5
Modo (M)	Lanço	11,2	22,6	27,1	161,3	15,6	36,0	6,3	57,9	2,5	17,8	5,8	26,0
	50/50	12,0	23,6	28,2	165,7	14,4	36,5	6,1	56,9	2,8	16,5	5,6	24,8
	Sulco	11,0	23,7	28,5	160,8	13,9	37,1	5,8	56,7	2,8	12,3	4,9	20,0
F		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
M		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	***	ns	***
FxM		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	***	ns	**
CV%		11	9	8	4	12	8	19	6	17	8	20	7
C vs demais		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C vs ST		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C vs FNR		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C vs lanço		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**	ns	*
C vs 50/50		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C vs sulco		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

NPm = número de planta por metro, ATR = açúcar total recuperável, TPH = tonelada de pol por hectare, Prod = produtividade, Fol, Col, Pon e Tot = massa seca de folhas, colmo, ponteiro e total, respectivamente. PFol, PCol, PPon, PTot = quantidade de P extraída pela folha, colmo, ponteiro e total, respectivamente. ST = superfosfato triplo, FNR = fosfato natural reativo, 50/50 = metade da dose a lanço + metade no sulco. Significâncias: ***, **, * e ns, significativos a 0,1, 1, 5% e não significativo pelo teste F, respectivamente. Letras diferentes indicam que os tratamentos diferem pelo teste t (LSD) ($p \leq 0,05$).

Possivelmente, o déficit hídrico ocorrido no ciclo de cana planta pode ter ajudado a mascarar o efeito do fertilizante aplicado pela diminuição da difusão do P e pela boa adaptação da variedade RB867515 a ambientes com baixo P, que pode estar relacionada a alta eficiência de uso interno de P desta cultivar, atingindo altos rendimentos de matéria seca com baixas concentrações de P em seus tecidos (OLIVEIRA et al., 2010) e/ou pela alta capacidade de absorver boa quantidade de P inorgânico de formas normalmente não disponíveis, principalmente ligadas a ferro e alumínio (OTANI; AE, 1996; ARROBAS et al., 2015).

A falta de resposta também pode ser devido ao fato do P disponível ser determinado em relação a um extrator específico (resina) e o solo apresentar uma quantidade de P-inorgânico e orgânico que não foi determinado pelo extrator, mas que pode ter sido utilizada pelas plantas (CROSS; SCHLESINGER, 1995; CHERUBIN et al., 2016). Isso pode ser uma explicação para a cana não responder a adubação fosfatada quando os níveis são classificados como baixos pelo extrator resina, principalmente em áreas já estabelecidas com a cultura e que receberam sequência de fertilização, a exemplo a área de Macatuba (SOUSA et al., 2015).

Singh et al. (2016), observaram que em solo com a fertilidade construída pela aplicação sequencial de fosfato, o declínio dos teores de P aconteceu lentamente e que a produtividade só foi diminuída a partir do sexto cultivo consecutivo. É de se esperar que a produtividade de cana-de-açúcar demore mais tempo para ser limitada pelo declínio do P do solo na área estabelecida de Macatuba em relação a área de expansão de Agudos em função desta última não ter recebido fertilização fosfatada e ser classificada como um ambiente de baixa produtividade (ROSSETTO; DIAS; VITTI, 2008; SAVINI et al., 2016; SINGH et al., 2016).

Os resultados da análise de variância são confirmados pela comparação, por meio de contrastes, entre os tratamentos testados e o controle, mostrando que a adubação fosfatada de plantio não afetou as seguintes variáveis: produtividade, rendimento de ATR, TPH, produção de massa seca e extração de P pela parte aérea da cana-de-açúcar no ciclo de cana planta para os experimentos de Agudos e Macatuba, exceto para o P extraído pela folha em Agudos.

Omollo e Abayo (2011), avaliando o efeito de fontes e doses de P no rendimento agrícola e industrial da cana-de-açúcar observaram que as fontes DAP, super triplo, super simples e fosfato de rocha não afetaram a produtividade de colmos industrializáveis das variedades Co 421 nos ciclos de cana planta e 1ª soca e KEN 82-808, nos ciclos de cana planta, 1ª e 2ª soca até a dose de 120 kg ha⁻¹. Esses resultados indicam que qualquer uma das fontes podem ser aplicadas para atender a demanda da cultura, particularmente em solos que vêm recebendo sequência de adubações fosfatadas e que apresentam alto efeito residual

(PARFITT, 1989). A resposta da cana-de-açúcar a aplicação de fósforo nem sempre é observada, mesmo em condições de muito baixo P determinado por testes de solo, a exemplo da resina.

As diferenças obtidas nas pesquisas são resultados de uma gama de fatores, como a variedade utilizada, propriedades do solo, manejo adotado, condições climáticas dentre outros. Sousa et al. (2015), não observaram diferenças no rendimento da variedade RB86-7515, a mesma utilizada neste estudo, entre fontes de solubilidades variadas na dose de 300 kg ha⁻¹ de P₂O₅ total, aplicada em pré-plantio durante três anos, ou seja, na cana planta, 1^a e 2^a socas. No ciclo de cana planta os autores verificaram que as fontes super triplo, MAP, fosfato de Arad, fosfato Itafós e termofosfato apresentaram rendimento igual ao tratamento controle. Caione et al. (2015) relataram que as fontes super triplo, fosfato de araxá e bayóvar não afetaram a acumulação de P pelo colmo, folha, ponteiro e P-total, altura, diâmetro, número de colmo e nem a produtividade de colmo e palhada da variedade CTC-15, mesma quantidade de P fornecida sendo baseada no P solúvel de cada fonte. Isso sugere que tanto na cana planta de Agudos como na de Macatuba houve a liberação de P ligado aos constituintes do solo, além das quantidades determinadas pela resina (SHARPLEY, 1985).

No presente estudo, para a cana planta, o efeito da adubação fosfatada ocorreu no P extraído pela folha, com exceção do fosfato reativo e da aplicação no sulco, e para o P extraído pelo colmo, já para o P total da parte aérea somente para o modo de aplicação a lanço (Figura 11). No experimento de Macatuba houve apenas incremento do modo de aplicação a lanço em relação ao controle para o P extraído pelo colmo e o P total extraído pela parte aérea. Os resultados da análise de variância mostraram que no ciclo de cana planta houve efeito isolado do modo de aplicação para o P extraído pelo colmo (PCol) e o P total (PTot) extraído pela parte aérea da cana-de-açúcar e interação entre fonte e modo de aplicação para o P extraído pela folha (PFol) no experimento de Agudos (2014) e a interação para essas três variáveis no experimento de Macatuba (2015) (Tabela 4).

Apesar da análise de variância não mostrar efeito da fonte para o P total extraído pela parte aérea no experimento de Agudos 2014, o teste LSD ($p < 0,05$) indicou que o superfosfato triplo (ST) proporcionou extração de 14,2 kg ha⁻¹ de P, sendo superior aos 12 kg ha⁻¹ extraídos quando a fonte utilizada foi o fosfato natural reativo (FNR). O colmo extraiu 8,5 kg ha⁻¹ de P na aplicação a lanço superando os outros dois modos.

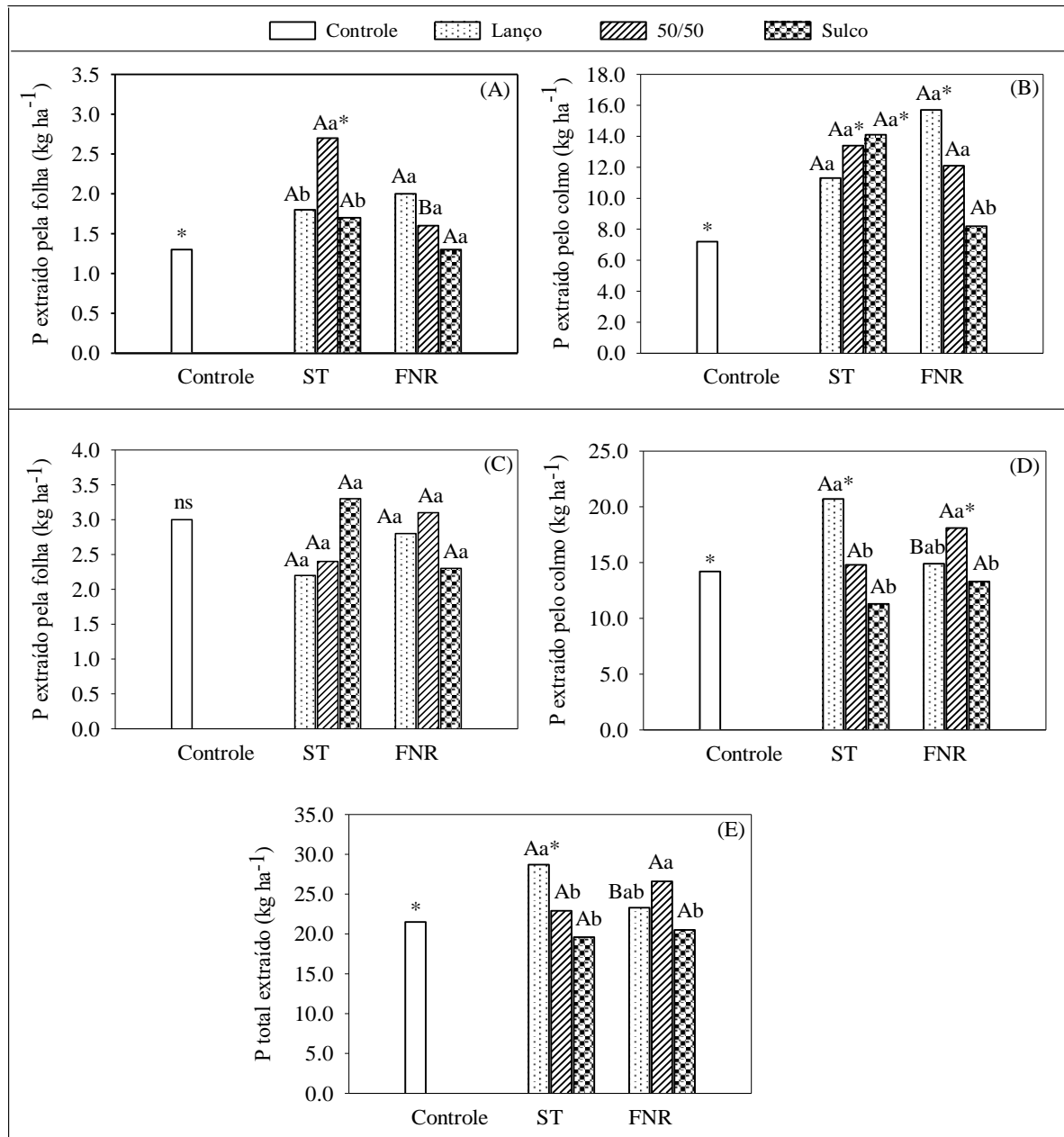


Figura 11. Desdobramentos da extração de P pela folha, colmo e P total extraído pela cana-de-açúcar em diferentes fontes de fósforo e modos de aplicação da adubação fosfatada. Agudos 2014 (A), Agudos 2015 (B) e Macatuba 2015 (C-E). *indica diferença entre os tratamentos e o controle pelo teste de Dunnett ($p < 0,05$). Letras maiúsculas compara as fontes de P em cada modo de aplicação e minúscula compara o modo de aplicação em cada fonte pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

A maior extração de P total foi 15,2 kg ha⁻¹ de P quando a dose foi aplicada a lanço, diferindo somente do modo de aplicação no sulco, o qual extraiu 11,6 kg ha⁻¹ de P pela cana planta (Tabela 4). Oliveira et al. (2010), observaram que a variedade RB86-7515 foi a que extraiu e exportou a menor quantidade de P em cultivo sob irrigação plena, com 19 kg ha⁻¹ de P extraído e 9 kg ha⁻¹ exportado pelos colmos industrializáveis.

Ainda em Agudos 2014, fazendo o desdobramento da interação, nota-se que o P extraído pela folha foi maior sob a fonte ST e aplicado metade a lanço e metade no sulco

(50/50), quando comparado com a aplicação 100% a lanço ou 100% no sulco (Figura 11A). Para o FNR a extração de P pela folha foi indiferente quanto ao modo de aplicação. A comparação das fontes nos modos de aplicação mostrou que o ST foi superior ao FNR quando aplicados 50/50 para a extração de P pela folha. Comparando-se os tratamentos fertilizados com o controle por meio do teste de Dunnett ($p < 0,05$) para o P extraído pela folha, observa-se que o ST 50/50 foi o único que diferiu (Figura 11A).

Para a cana planta de Macatuba (2015) a análise de variância indicou interação para o P extraído pela folha, mas não se verificou diferença entre tratamentos e nem com o controle quando foram comparados pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$) e Dunnett ($p \leq 0,05$), respectivamente (Figura 11C). O P extraído pelo colmo e o P total extraído pela parte aérea da variedade CTC-16 apresentaram a mesma tendência de comportamento, devido ao P extraído pelo colmo representar mais de 60% do P total extraído pela parte aérea.

Na fonte ST, o modo de aplicação a lanço proporcionou quantidades de P extraído pelo colmo e P total superiores aos modos aplicação no sulco ou misto (50/50) e ao controle e FNR aplicado a lanço para as duas variáveis citadas (Figuras 11D e 11E). Como esperado, a extração de P pelo colmo e o P total no FNR foi mais eficiente quando aplicado 50/50, porém superou o controle apenas para o P do colmo (Figura 11D).

O comportamento do ST foi o oposto ao que se espera de fontes solúveis em solos de média a alta capacidade de sorção para o P extraído pelo colmo e o P total extraído pela parte aérea (Figuras 11D e 11E). Para essa condição de solo é recomendado que a dose de P seja distribuída em um menor volume de solo para diminuir as reações de P com o solo e aumentar a sua eficiência. A diminuição do volume de solo em contato com o fertilizante estimula as raízes a se concentrarem na região fertilizada e promoverem alterações na sua morfologia, como diminuição do raio radicular e aumento do comprimento das raízes para aumentar o influxo de P por superfície de área de raiz e compensar a menor área de absorção de P pelas raízes (ANGHINONI; BARBER, 1980; BORKERT; BARBER, 1985).

Dados de três anos de experimento de campo com essa mesma variedade, RB86-7515, em solo pobre em P e com alta capacidade de sorção, mostraram que o rendimento de colmos nos três anos com ST na dose de 200 kg ha^{-1} de P_2O_5 aplicada toda a lanço ou metade dessa dose a lanço + metade no sulco foi superior a aplicação na forma localizada no sulco de plantio (REIN; SOUSA, 2013). Estes resultados sugerem que o aumento no rendimento da cana e a eficiência do fertilizante em solos com baixo P e alta sorção deve ser alcançado com o aumento do volume de solo fertilizado com P no plantio e/ou com a associação de aplicação em área total e localizada para fontes solúveis. Há indicativo de que o mais importante fator na

maximização da eficiência do fertilizante deve ser a sua disponibilidade na zona radicular do que a restrição da imobilização química pela concentração do fertilizante em reduzido volume de solo (HOLFORD, 1989).

O fato dessa área estar sendo cultivada com cana por longos períodos e ter recebido adubação fosfatada a cada renovação do canavial pode ter diminuído a energia de ligação do P com os constituintes minerais do solo (PARFITT; HUME; SPARLING, 1989; HE et al., 1994), permitindo que as raízes tivessem acesso a mais P por unidade de volume de solo.

Quando avaliada a soqueira (Agudos, 2015), a análise de variância mostrou efeito das fontes para a massa seca do colmo, massa seca total da parte aérea e para o P total extraído (Tabela 4). No entanto, o teste LSD ($p < 0,05$) não verificou diferença entre as médias dessas variáveis, mas encontrou diferença do modo de aplicação para o P extraído pela folha, indicando que o modo de aplicação 50/50 foi superior ao sulco.

Os resultados da interação entre fonte x modo de aplicação para o P extraído pelo colmo no ano de 2015 não variou com os modos de aplicação para o ST (Figura 11B). Para o FNR a maior extração foi obtida quando este foi distribuído a lanço ou 50/50 (Figura 11B). A extração de P pelo colmo não diferiu entre as fontes dentro do mesmo modo de aplicação. Comparando-se com o controle, o ST foi superior quando aplicado total ou parcial no sulco, enquanto o FNR superou o controle somente quando foi aplicado todo a lanço (Figura 11B). Os resultados são compatíveis com a solubilidade das fontes e a recomendação da localização de fontes solúveis em menor volume de solo e a distribuição de fontes reativas em volume total de solo (KHASAWNEH; DOLL, 1978; ANGHINONI; BARBER, 1980).

O interessante para a produção é que haja ganho de produtividade de colmo industrializáveis em quantidade e qualidade de açúcar. A importância de conhecer a produção de massa seca de cada parte da planta e a quantidade de nutriente extraída tem utilidade para manejo onde se retira a palhada da área ou para simplesmente saber o que está retornando ao solo do total extraído pela planta. Observa-se que entre 30 e 50% do P total extraído retornou ao solo por meio das folhas e dos ponteiros (Tabela 4).

O contraste entre controle e os demais tratamentos mostrou que a adubação fosfatada de plantio aumentou o rendimento de ATR e TPH, a produtividade de colmos industrializáveis e a extração de P pela parte aérea da cana-de-açúcar no ciclo de primeira soca em Agudos (2015). As fontes apresentaram uma performance similar para o rendimento agrícola e industrial. No entanto, a aplicação do fertilizante fosfatado no fundo do sulco, manejo tradicionalmente adotado para áreas produtoras de cana-de-açúcar no Brasil, foi igual ao tratamento sem a aplicação de P para a produtividade de colmos industrializáveis e o P

total extraído pela parte aérea dois anos após a aplicação na área de expansão (Tabela 4). Pesquisas de campo com cana-de-açúcar têm demonstrado maior produtividade de colmos industrializáveis com a aplicação de parte da dose recomendada aplicada a lanço e parte localizada no sulco para fontes solúveis e reativas em solos com baixos teores de P, tanto de baixa como de alta capacidade de adsorção de fosfato (MEYER, 1980; MORELLI et al., 1991; REIN; SOUSA, 2013). O acompanhamento dos experimentos por um período maior de tempo é necessário para a definição do melhor manejo da adubação fosfatada para a cultura.

Analisando-se os dados de produtividade dos dois anos de cultivos para o experimento de Agudos, apresentados na tabela 4, é possível observar que houve um aumento na produtividade de colmo na soqueira (2015) em relação a cana planta em todos os tratamentos. O tratamento controle teve um incremento de 9,2, 2,0 e 2,3 t ha⁻¹ de colmo, ATR e TPH, respectivamente em 2015. As fontes variaram de 15,7; 3,5 e 4,3 para o ST a 20,0; 3,9 e 4,6 t ha⁻¹ para o FNR em colmo, ATR e TPH, respectivamente. Os modos de aplicação apresentaram valores de 18,3; 4,1 e 5,1 para o lanço, 21,5; 4,1 e 4,8 para o 50/50 e de 13,9; 2,8 e 3,5 t ha⁻¹ para o sulco em colmo, ATR e TPH, respectivamente. Isso representa um incremento médio de 8% para o controle e 15% para os tratamentos avaliados.

O menor rendimento da cana planta em Agudos em relação a 1ª soca pode estar relacionado com as condições climáticas adversas predominantes no primeiro ano de cultivo. No ciclo de cana planta a precipitação foi de 650 mm, enquanto na 1ª soca ultrapassou os 1300 mm (Figura 2). Houve estresse hídrico na fase de estabelecimento e perfilhamento (agosto-dezembro) e no início da fase de alongação e crescimento do colmo (janeiro-fevereiro) no ciclo da cana planta, o que reduziu as taxas de crescimento da cultura (RAMESH, 2000; LIU et al., 2016).

O número de planta por metro (N_{Pm}) foi menor na cana planta com um máximo de 7,6 e foi igual ou superior a 9 no segundo ciclo (Tabela 4). Isso sugere que a diminuição deve ter sido consequência do déficit hídrico ocorrido no primeiro ano de implantação do experimento (Figura 2) e da baixa capacidade de armazenamento de água no solo dessa área em função da sua textura arenosa (Tabela 1). Além da interferência da falta de umidade do solo na formação e desenvolvimento da planta, também há influência na absorção de P, em virtude do menor conteúdo de água do solo diminuir a difusão do P da solução em direção às raízes das plantas, mesmo em solos de baixa capacidade de sorção.

O estresse hídrico na fase de perfilhamento aumenta a mortalidade de perfilhos, diminui a altura e diâmetro dos colmos, reduzindo o rendimento na colheita. Ramesh e Mahadevaswamy (2000), observaram uma queda na produção de colmo industrializáveis de

117 t ha⁻¹, no tratamento sem estresse hídrico, para 71,9 t ha⁻¹ quando foi repostado apenas 20% da reserva de água do solo. Eles observaram que as perdas devido a seca somaram 45,1 t ha⁻¹ e que os perfis formados nos primeiros 30 dias após o plantio registraram perdas de 30,7 t ha⁻¹ e foi de 12,5 t ha⁻¹ para aqueles que emergiram entre 30 e 60 dias após o plantio.

Dividindo-se o P total extraído pela RB86-7515 pela produtividade do respectivo tratamento, observa-se que o controle apresentou uma eficiência de 0,10 e 0,11 kg de P para produzir 1 t de colmo industrializável na cana planta e soca de Agudos, respectivamente. Em 2014, ano de déficit hídrico, a exceção do modo de aplicação a lanço, todos os tratamentos apresentam uma eficiência de 0,11 kg de P t⁻¹ de colmo produzido (Tabela 4). No ano seguinte, com condições climáticas mais favoráveis, essas taxas de eficiência se alteraram para valores entre 0,13 e 0,15 kg de P t⁻¹ de colmo produzido.

A eficiência interna de utilização de P também foi observada por Oliveira et al., (2010) em condição de irrigação plena, onde essa cultivar usou 0,10 kg de P para cada tonelada de colmo produzida. Essa variedade é considerada eficiente porque apresenta boas produtividades em baixos teores de P do solo e ainda deve apresentar mecanismos internos que melhoram a eficiência de uso P do solo e/ou liberação de ácidos orgânicos, aumentando a eficiência de aquisição e utilização (SUNDARA, 1994).

Os resultados obtidos na literatura com fontes de P altamente solúvel e de liberação relativamente lenta têm demonstrado pouca ou nenhuma diferença entre as fontes no rendimento agroindustrial da cana-de-açúcar nos ciclos de cana planta, 1^a e 2^a soca (OMOLLO; ABAYO, 2011; REIN; SOUSA, 2013; CAIONE et al., 2015; SOUSA et al., 2015) e está em acordo com os resultados obtidos no presente estudo para o ciclo de cana planta e 1^a soca. Isso sugere a possibilidade de uso da fonte menos dispendiosa financeiramente, com liberação contínua de P, em taxas que atendam as necessidades da cultura e permitam maior eficiência de aproveitamento, em função da diminuição da adsorção desta pelos minerais do solo, e que apresente maior efeito residual.

Os resultados da eficiência de P são apresentados na tabela 5. Observa-se tendências diferentes para todas as variáveis. Para a produção de colmos, a eficiência do ST variou de 111 kg kg⁻¹ P na aplicação a lanço a 220 kg kg⁻¹ P quando foi aplicado no sulco de plantio, isso para o ciclo de cana planta em Agudos (2014). Neste mesmo ciclo, o FNR variou de 32 a 113 kg kg⁻¹ P para a aplicação de 50/50 e 100% a lanço, respectivamente.

A fórmula (3) do item 2.2.5 representa o tradicional método da diferença, o qual considera o P nativo do solo por meio do tratamento controle (CHIEN et al., 2012), ou seja, a quantidade produzida por um determinado tratamento é referente ao P já existente no solo

(controle) + o P adicionado via fertilizante. Valores próximos de zero ou negativos, obtidos por esse método (Tabela 5) é indicativo de que o tratamento avaliado teve rendimento similar ou menor que o tratamento controle, isto é, a reserva de P nativo do solo foi suficiente para garantir boas produtividades ou que a adição de fertilizante promoveu pouca ou nenhuma alteração no rendimento. Usando o exemplo acima da fonte ST, aplicada no sulco, onde a variedade RB86-7515 usou um 1 kg de P para produzir 220 kg de colmo, isso seria equivalente a $17,3 \text{ t ha}^{-1}$ de colmo industrializável em função da quantidade de P aplicada. Somando-se a esta quantidade a massa de colmo produzida pelo controle (Tabela 4) ou proveniente do P nativo do solo (método da diferença), a qual foi $110,2 \text{ t ha}^{-1}$, o tratamento teria produzido um total de $127,5 \text{ t ha}^{-1}$ de colmo, ou seja, 86% do total de colmo produzido pelo tratamento teria como origem a reserva de P do solo.

Tabela 5. Eficiência agrônômica-industrial e de recuperação do P aplicado no solo pela cana-de-açúcar de fontes e formas de aplicação da adubação fosfatada em Agudos e Macatuba - 2014 e 2015.

Tratamento	Eficiência Agrônômica e industrial				Eficiência de recuperação
	Colmo	ATR	TPH	MS total	
-----kg kg ⁻¹ -----					%
Agudos 2014 - cana planta					
ST Lanço	111	4	8	-5	6
ST 50/50	198	22	32	26	4
ST Sulco	220	31	44	14	2
FNR Lanço	113	10	17	37	5
FNR 50/50	32	5	9	-49	0
FNR Sulco	44	2	3	-68	-1
Agudos 2015 - cana soca (1ª)					
ST Lanço	235	38	46	99	7
ST 50/50	307	41	47	151	12
ST Sulco	239	37	46	133	11
FNR Lanço	222	32	40	67	12
FNR 50/50	238	39	48	103	9
FNR Sulco	145	17	20	-12	1
Agudos 2014-2015 - cana planta e soca (1ª)					
ST Lanço	346	42	54	94	13
ST 50/50	506	63	79	177	16
ST Sulco	459	68	91	147	13
FNR Lanço	335	43	57	103	17
FNR 50/50	270	43	57	55	9
FNR Sulco	189	19	23	-79	1
Macatuba 2015 - cana planta					
ST Lanço	56	-2	-8	20	9
ST 50/50	153	24	26	17	2
ST Sulco	5	17	20	33	-2
FNR Lanço	44	12	17	23	2
FNR 50/50	59	11	12	1	7
FNR Sulco	83	22	26	-19	-1

ATR = açúcar total recuperável, TPH = tonelada de pol por hectare, MS = massa seca, ST = superfosfato triplo, FNR = fosfato natural reativo, 50/50 = metade da dose a lanço + metade no sulco.

O maior valor de produção de colmo industrializável por kg de P aplicado do FNR foi obtido quando este foi aplicado a lanço e foi similar aos valores obtidos pelo o ST também a lanço. Nos modos de aplicação onde o P foi distribuído 50/50 e 100% no sulco para o ST, a quantidade de colmo produzida para cada kg de P_2O_5 aplicado foi 6 e 5 vezes superior à do FNR nos referidos modos de aplicação.

De forma geral, a fonte solúvel apresentou melhor eficiência para a produção de colmo quando foi distribuída 100% no sulco. Enquanto a fonte reativa foi mais eficiente na aplicação a lanço, exceto para o super triplo na cana soca de Agudos e na cana planta de Macatuba, onde o modo de aplicação 50/50 conseguiu produzir uma quantidade maior de colmo por kg de P aplicado (Tabela 5).

A produção de ATR e TPH da cana apresentou tendência similar aos observados para a produção de colmo, alterando-se apenas os valores em função dessas variáveis passarem por duas etapas de cálculos: a) determinação das quantidades ($t\ ha^{-1}$) como descrito no item 2.2.5 por meio das fórmulas (1) e (2) para ATR ($kg\ t^{-1}$) e TPH (%), respectivamente e b) cálculo do rendimento de ATR e TPH para cada kg de P aplicado, utilizando-se o tratamento controle como feito para a produção de colmo.

Observa-se na tabela 5 que quando o ST foi aplicado no sulco a cana produziu 31 e 44 kg de ATR e TPH, respectivamente, para cada kg de P aplicado. Isso significa que das 15,6 e 18,4 $t\ ha^{-1}$ de ATR e TPH, respectivamente (Tabela 4), somente 2,4 e 3,5 $t\ ha^{-1}$ foram produzidas pelo P adicionado ao solo, ou seja, uma pequena parcela, e foi menor ainda para a fonte reativa quando teve pelo menos metade da dose aplicada no sulco.

A produção de matéria seca teve comportamento semelhantes às demais variáveis agronômicas e industriais, inclusive apresentando valores negativos, indicando que o tratamento controle produziu quantidades superiores ao ST aplicado a lanço e ao FNR aplicado total ou parcial no sulco para o ciclo de cana planta (Tabela 5).

A eficiência de recuperação do P aplicado foi baixa, comprovando que maior parte do P utilizado pela RB86-7515 foi oriunda da reserva de P do solo e confirma os relatos da literatura sobre o baixo índice de aproveitamento do P aplicado no primeiro ano de cultivo (GOH; CONDRON, 1989; JOHNSTON et al., 2014). A maior recuperação do P aplicado no primeiro ciclo de cultivo foi de 6% para o ST aplicado a lanço, devido aos maiores teores no colmo, o qual compõe cerca de 60% do P total extraído.

A baixa eficiência observada no ciclo de cana planta deve estar relacionada, em parte com o déficit hídrico ocorrido no período (Figura 2), e com menor produtividade e extração de P pela cana. Como também com a distribuição da fonte reativa de forma localizada e em

grandes quantidades, pois tais quantidades foram determinadas com base no P solúvel em ácido cítrico, o que pode ter comprometido sua reação com os ácidos do solo, dificultando sua dissolução (RAJAN; WATKINSON; SINCLAIR, 1996).

Na soqueira e no acumulado dos dois anos (cana planta e 1ª soca) observa-se aumento na eficiência para a produção de colmo, ATR, TPH, massa seca e para o P recuperado pela variedade RB86-7515. No entanto, observa-se uma certa limitação para o FNR distribuído no sulco para todas as variáveis avaliadas, inclusive sendo negativo para a produção de massa seca dois anos após a sua aplicação. O P recuperado pelo FNR a lanço foi de 17% e somente de 1% quando aplicado no sulco de plantio para o somatório dos ciclos de cana planta e 1ª soca (Tabela 5), indicativo de que esse tratamento apresentou produção de massa seca e P total extraído pela cana similar ao controle, o que confirma que fontes reativas liberam o P de forma gradativa e aumentam a sua eficiência ao longo dos anos de sua aplicação (GHOSAL et al., 2003; KORNDÖRFER; MELO, 2009).

A produção de colmo, massa seca e P total extraído pela CTC-16 no experimento de Macatuba foram maiores que as obtidas pela variedade RB86-7515 em Agudos (Tabela 4), mas isso parece ter sido às expensas do P oriundo do solo e/ou é indicativo de consumo de luxo. O solo deste local apresentou um nível de P resina baixo, de acordo com o boletim 100 (RAIJ et al., 1997), mas os baixos índices de eficiência apresentados na tabela 5 para este solo sugerem que parte dos sítios de sorção de alta energia foram, provavelmente, bloqueados pelo fertilizante fosfatado adicionado ao solo ao longo dos anos de cultivos com cana-de-açúcar (HE et al., 1994; BARROW; BOLLAND; ALLEN, 1998).

Houve uma tendência do ST ser mais eficiente no modo de aplicação 50/50 e o FNR na aplicação no sulco para a produção de colmo, ATR e TPH, mas para a eficiência de recuperação há uma inversão, onde o ST recuperou mais P no modo de aplicação a lanço e o FNR no modo 50/50 (Tabela 5), em função destes terem apresentados maiores concentrações de P em seus tecidos, principalmente no colmo. É necessário o acompanhamento por mais ciclos de cultivo para podertirar conclusões mais realistas.

Os resultados são compatíveis com o grau de solubilidade ou dissolução dessas fontes e estão em acordo com a recomendação de manejo. Em estudo avaliando a influência de fosfatos de solubilidade variada na disponibilidade de P do solo e no rendimento das culturas, Gikonyo et al. (2010) observaram relação direta com a solubilidade da fonte, sendo o ST a fonte que proporcionou o maior rendimento e a maior quantidade de P extraível. Fontes de P solúveis devem ser aplicadas de forma localizada em menor volume de solo para aumentar a eficiência de uso do nutriente, principalmente em solos com média a alta capacidade de

adsorção. Enquanto as fontes reativas devem ser distribuídas no completo volume de solo para elevar a superfície de contato com o solo e aumentar a sua reatividade (BORKERT; BARBER, 1985).

2.3.2 Fracionamento do P do solo

a) Experimento de Agudos (Ano agrícola 2014)

Os resultados da análise de variância, apresentados na tabela 6, mostram que de forma geral a aplicação de fertilizante fosfatado afetou as concentrações de P do solo após um ano da sua aplicação nas três profundidades avaliadas, principalmente nas frações lábeis P-resina (P-res) e Pi-bic, que juntas com a fração Po-bic compõem o P-lábil do solo. Essas formas de P são consideradas prontamente disponíveis para serem utilizadas por plantas e microrganismos do solo (HEDLEY; STEWART; CHAUHAN, 1982; TIESSEN; STEWART; COLE, 1984; CROSS; SCHLESINGER, 1995), com suas somas representando em média 17, 20 e 16% do P total do solo nas camadas 0-10, 10-20 e 20-40 cm, respectivamente. Os teores de P lábil do solo da área de expansão de Agudos (Tabela 7) ajudam a explicar a falta de resposta da cana planta à adubação fosfatada em solo com teores de P muito baixo, determinado pelo extrator resina, devido o P da fração P-resina ter representado de 10 a 15% do P lábil no ano de 2014. Isso sugere que a cana planta foi suprida com P inorgânico da fração Pi-bic e pela mineralização do P orgânico da fração Po-bic (SHARPLEY, 1985).

Os dados da análise de variância indicaram que as fontes fosfatadas influenciaram as frações Po-hid0.1 e Pi-hid0.5 na camada 0-10 cm. Para o Pi-hid0.5, o FNR foi mais apto que o ST em elevar as concentrações dessa fração, atingindo 23,5 mg kg⁻¹, enquanto o ST registrou 19,2 mg kg⁻¹. O ST foi similar ao controle quando comparado por meio de contrastes para essa fração (Tabelas 6 e 7). O teste LSD ($p \leq 0,05$) não registrou efeito da fonte para o Po-hid0.1, mas indicou diferenças para a fração Pi-hid0.1, com teores de 24,1 e 19,3 mg kg⁻¹ e Pi-bic com 14,1 e 10,2 mg kg⁻¹ para o ST e FNR, respectivamente. A elevação dos níveis de Pi-bic pelo super triplo em comparação com fosfato natural reativo e não reativo também foi observada por Caione et al. (2015) em solos cultivados com cana-de-açúcar no estado de São Paulo. Como esperado, o modo de aplicação a lanço incrementou as frações P-resina, P-lábil e P

Tabela 6. Análise de variância e contrastes de frações de fósforo em amostras de solo cultivado com cana-de-açúcar sob diferentes fontes/modos de aplicação da :
fosfatada, Agudos-SP, 2014.

Efeito	P-res	Pi-bic	Po-bic	Pi-hid 0.1	Po-hid 0.1	P-HCl	Pihid 0.5	Po-hid 0.5	P-resid	Ptot	P-labil	P-Mod lábil	P-Não lábil	P-inorg	P-org
Teste F - camada 0-10 cm															
Fonte (F)	ns	ns	ns	ns	*	ns	**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Modo (M)	*	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	*	*	ns	ns	ns
FxM	ns	ns	ns	ns	ns	**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
CV%	14	15	3	5	6	24	12	15	16	12	4	11	23	3	10
Contraste															
C vs demais	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C vs ST	*	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C vs FNR	ns	ns	ns	ns	ns	**	*	ns	ns	ns	ns	**	ns	ns	ns
C vs lanço	**	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns
C vs 50/50	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	**	ns	ns	ns
C vs sulco	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Teste F - camada 10-20 cm															
Fonte (F)	*	*	ns	*	ns	**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Modo (M)	*	**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns	*	ns
FxM	ns	**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns
CV%	20	8	51	10	29	9	27	30	19	4	6	8	12	3	11
Contraste															
C vs demais	**	**	ns	ns	ns	<***	ns	ns	ns	*	**	ns	ns	<***	ns
C vs ST	***	***	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**	ns	ns	***	ns
C vs FNR	**	ns	ns	ns	ns	<***	*	ns	ns	**	*	*	ns	<***	ns
C vs lanço	ns	ns	ns	ns	ns	**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**	ns
C vs 50/50	***	**	ns	ns	ns	<***	ns	ns	ns	*	*	*	ns	<***	ns
C vs sulco	***	***	ns	*	ns	***	*	ns	ns	**	***	*	ns	<***	ns
Teste F - camada 20-40 cm															
F	ns	**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**	ns	ns	ns	*	ns
M	ns	*	ns	ns	ns	*	ns	ns	**	*	*	*	**	**	ns
FxM	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns	**	*	ns
CV%	36	17	26	21	44	25	5	9	8	17	6	8	7	12	25
Contraste															
C vs demais	*	*	ns	ns	ns	**	ns	**	ns	ns	ns	ns	*	**	ns
C vs ST	*	**	ns	ns	ns	ns	ns	*	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C vs FNR	ns	ns	ns	ns	ns	***	ns	**	ns	ns	ns	*	*	***	ns
C vs lanço	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C vs 50/50	ns	**	ns	*	ns	ns	ns	**	*	ns	*	ns	*	*	ns
C vs sulco	**	**	ns	ns	ns	**	ns	**	ns	*	ns	**	**	<***	ns

C = controle, ST = superfosfato triplo, FNR = fosfato natural reativo, 50/50 = metade da dose aplicada a lanço + metade da dose aplicada no sulco, CV = coeficiente de variação. <***, ***, **, * e ns significativos a menos de 0,1%, 0,1, 1, 5% e não significativo, respectivamente.

Tabela 7. Frações de fósforo em amostras de solo cultivado com cana-de-açúcar sob diferentes fontes e modos de aplicação da adubação fosfatada, Agudos-SP, 2014.

Tratamento		P-res	Pi-bic	Po-bic	Pi-hid 0.1	Po-hid 0.1	P-HCl	Pihid 0.5	Po-hid 0.5	P- resid	Ptot	P-labil	P-Mod lábil	P-Não lábil	P-inorg	P-org
camada 0-10 cm																
mg kg ⁻¹																
Controle		3,6	8,9	12,3	20,8	20,5	5,5	19,4	5,3	52	148	24,7	46,8	76,7	110,3	37,8
Fonte (F)	ST	5,9	14,1a	11,1	24,1a	21,7	8,1	19,2b	7,9	47	159	31,0	54,0b	74,2	118,7	40,3
	FNR	4,7	10,2b	13,0	19,3b	31,1	32,1	23,5a	4,9	48	185	27,7	82,6a	76,3	137,6	48,6
Modo (M)	Lanço	6,8a	13,1	12,8	22,2	21,6	32,2	22,0	6,5	44	181	32,8a	76,2a	72,3	140,3	40,8
	50/50	5,3ab	12,5	11,2	22,4	35,9	22,2	22,3	5,8	42	177	29,0ab	80,7a	69,7	126,0	52,7
	Sulco	4,0b	10,8	12,0	20,5	21,6	5,9	19,9	7,3	57	156	26,2b	48,0b	83,5	118,0	39,8
camada 10-20 cm																
Controle	Sem P	2,8	8,1	10,5	19,0	21,6	3,3	19,7	10,6	43	139	21,3	43,8	73,7	95,6	42,7
Fonte (F)	ST	12,0	23,8	10,3	31,0a	26,9	4,8b	22,5	8,4	47	186	46,1	62,8	77,7b	140,8	45,6
	FNR	6,2	9,4	18,4	19,0b	19,2	36,4a	28,8	8,4	53	199	33,9	74,9	90,1a	154,1	46,1
Modo (M)	Lanço	4,0b	8,8	14,2	19,3b	14,4	15,5	23,0	7,8	51	156b	27,2b	48,5b	81,7	121,5b	35,5
	50/50	10,6a	15,3	10,3	22,5ab	33,4	24,3	23,9	9,9	53	202a	37,2ab	80,2a	86,3	149,3a	54,7
	Sulco	13,9a	25,7	17,3	33,2a	20,6	16,7	30,0	7,5	46	210a	55,7a	70,5ab	83,7	165,2a	45,2
camada 20-40 cm																
Controle		2,3	6,5	13,6	13,6	23,2	1,8	25,3	1,1	43	131	22,3	38,7	70,0	92,7	38,0
Fonte (F)	ST	4,3	11,3	10,8	16,6	26,4	2,8b	21,6b	5,7	49	149b	27,1	45,6	76,4	106,4	42,1
	FNR	4,1	7,4	13,6	18,7	21,3	31,1a	27,3a	9,2	47	180a	25,1	71,2	83,4	132,8	44,2
Modo (M)	Lanço	2,6b	6,8	11,5	15,6	22,6	8,9b	23,4ab	2,3b	47	140b	21,0b	47,2b	72,2	104,4	36,3
	50/50	4,5ab	11,0	14,6	19,7	21,9	2,9b	20,7b	8,8ab	52	156ab	29,8a	44,5b	81,0	110,2	45,0
	Sulco	5,8a	10,1	10,5	18,0	26,4	34,4a	29,3a	11,2a	46	191a	27,5a	79,0a	86,7	143,4	48,2

P-res = P extraído pela resina, Pi-bic e Po-bic = P inorgânico e orgânico extraído pelo bicarbonato (NaHCO₃ 0,5 M), respectivamente, Pi-hid 0.1 e Po-hid 0.1 = P inorgânico e orgânico extraído pelo hidróxido (NaOH 0,1 M), P-HCl = P extraído pelo ácido clorídrico (HCl 1 M), Pihid0.5 e Po-hid 0.5 = P inorgânico e orgânico extraído pelo hidróxido (NaOH 0,5 M), P-resid = P residual da amostra extraído com ácido sulfúrico e peróxido de hidrogênio após a sequência de extração. Ptot = P total (soma de todas as frações), P-labil = formas de P consideradas disponíveis para as plantas (soma do P-res, Pi-bic e Po-bic), P-Mod = P moderadamente lábil = formas de P que repõe o reservatório de P disponível para as plantas (soma de Pi-hid 0.1, Po-hid 0.1 e P-HCl), P-Não Lábil = formas de P que pode estar disponível mas no longo prazo, por serem formas inorgânicas e orgânicas muito estabilizadas quimicamente e fisicamente (soma de Pihid0.5, Po-hid 0.5 e P-resid), P-inorg = P inorgânico ou de origem mineral (P-res, Pi-bic, Pi-hid 0.1, P-HCl, Pihid 0.5 e P-resid), P-org = P orgânico originados de plantas e microrganismos (Po-bic, Po-hid 0.1 e Po-hid 0.5). ST = superfosfato triplo, FNR = fosfato natural reativo, 50/50 = metade da dose aplicada no sulco e metade a lanço ambos no plantio. CV = coeficiente de variação. **, *, ns significativos a 1 e 5% e não significativo pelo teste F, respectivamente. Letras diferentes indicam que os tratamentos diferem pelo teste t (LSD) (p ≤ 0,05).

moderadamente lábil, enquanto que o modo 50/50 superou a aplicação no sulco apenas no P moderadamente lábil. Isso é reflexo da distribuição em área total do fertilizante na superfície do solo. A fonte solúvel (ST) elevou os teores da fração Pi-hid0.1 em 1,6 vez mais do que a fonte reativa (FNR) na camada de 10-20 cm (Tabela 7). Essa fração tem sido identificada como um dreno de P da solução do solo nas regiões dos trópicos úmidos (CONTE; ANGHINONI; RHEINHEIMER, 2003), particularmente nos solos mais intemperizados, e deve reabastecer os reservatórios mais lábeis à medida que as plantas ou microrganismos absorvem o P da solução (TIESSEN; STEWART; COLE, 1984).

A fonte reativa elevou os teores da fração ácida (P-HCl) em mais de 7 vezes em relação a fonte solúvel em decorrência da sua alta quantidade de P na forma de apatita (P-Ca) ter sido dissolvida pela ação do extrator ácido, isso para todas as camadas avaliadas (Tabela 7). Não se observou diferenças entre as fontes para a fração P-resina. O modo de aplicação influenciou o P-resina e como consequência, o P-lábil. Na camada 10-20 cm o modo de aplicação na linha ou 50/50 foi maior que a lança. Enquanto de 0-10 cm o lança incrementou os teores nessa fração, na camada de 10-20 cm o incremento foi para o modo de aplicação no sulco. Isso deve ser consequência da incorporação do fertilizante a lança a cerca de 10-20 cm.

O teste LSD ($p \leq 0,05$) indicou aumentos nos teores de Pi-hid0.1, P-total, P-moderadamente lábil e P inorgânico quando a dose de 180 kg ha^{-1} de P_2O_5 foi distribuída total ou parcial no sulco, embora o teste F não tenha sido significativo para essas frações ou conjunto (Tabela 6).

Observou-se um incremento no P-total na camada de 20-40 cm para o FNR em relação ao ST e também as frações P-HCl e Pi-hid0.5 ($p \leq 0,05$). O aumento no P-HCl, e como consequência o P-total para a fonte reativa, é consequência da dissolução da fração ácida dessa fonte (P-HCl). O modo de aplicação apresentou tendência similar ao da camada 10-20 cm, com destaque para o efeito significativo da aplicação no sulco sobre a lança para as frações P-HCl, P total, P-lábil e P moderadamente lábil na camada de 20-40 cm. Mais uma vez, o teste LSD ($p \leq 0,05$) identificou diferenças entre os tratamentos para as frações P-resina, Pi-hid0.5 e Po-hid0.5, todas apresentando efeito significativo do sulco sobre o lança, com exceção Pi-hid0.5, para a qual a aplicação a lança não diferiu da aplicação no sulco (Tabela 7).

Houve interação entre os fatores fontes x modos de aplicação para as frações P-HCl na camada de 0-10 cm, Pi-bic e P inorgânico de 10-20 cm e Pi-bic, P-residual, P não-lábil e P-inorgânico na camada de 20-40 cm para a avaliação de Agudos em 2014 (Tabela 6). Os

resultados do desdobramento da interação fonte x modo de aplicação para as frações P-HCl na camada 0-10 cm e Pi-bic e P-inorgânico são apresentados na figura 12. A fração P-HCl não

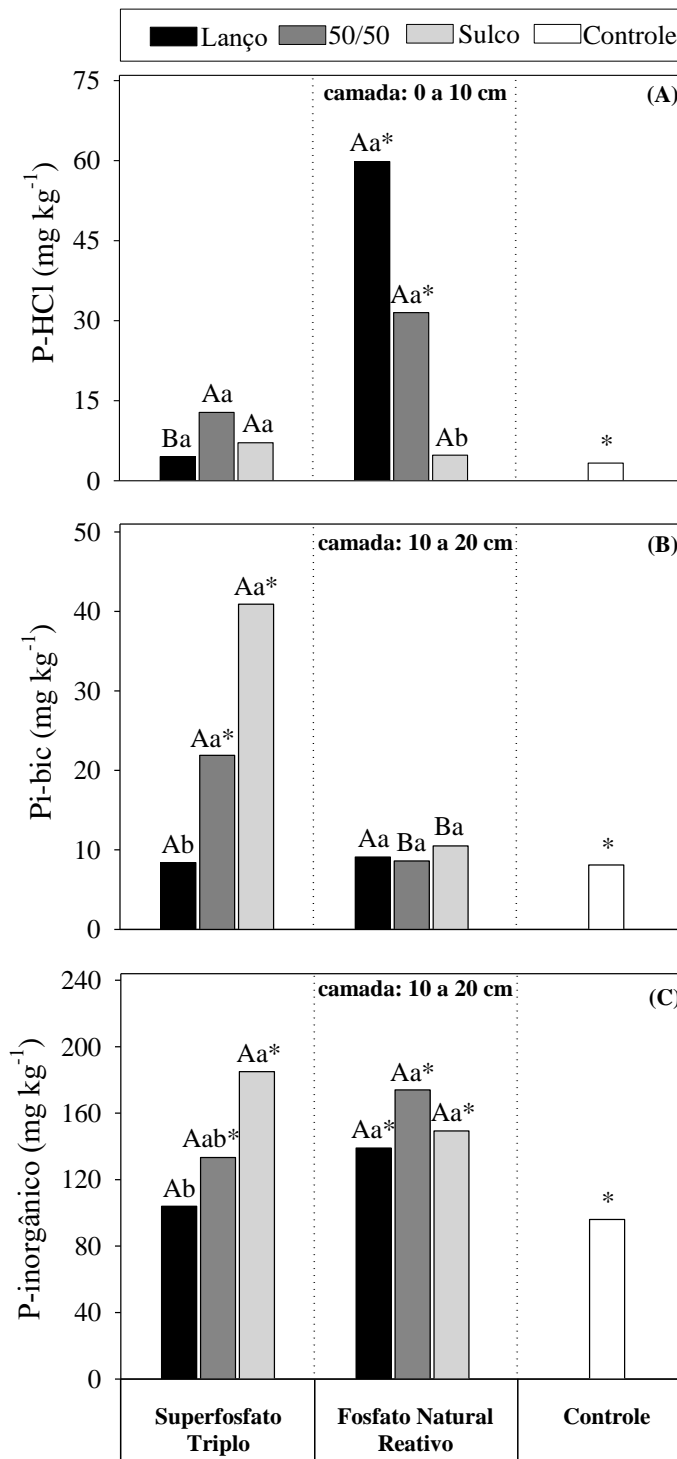


Figura 12. Desdobramentos das interações das frações de P da camada 0-10 e 10-20 cm de solo cultivado com cana-de-açúcar em fontes de fósforo e modos de aplicação da adubação fosfatada, Agudos 2014. P-HCl 0-10 cm (A), Pi-bic 10-20 cm (B) e P-inorgânico 10-20 cm (C). Letras minúsculas comparam o modo de aplicação em cada fonte e maiúsculas comparam as fontes de P em cada modo de aplicação pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). * indica diferença entre os tratamentos avaliados e o tratamento controle pelo teste de Dunnett ($p < 0,05$ e minúscula compara o modo de aplicação em cada fonte).

foi influenciada pelo modo de aplicação para a fonte solúvel ST, assemelhando-se ao controle (Figura 12A). Para a fonte reativa FNR, observou-se um grande aumento nos teores de P dessa fração quando o fertilizante foi aplicado total ou parcial a lanço na camada de 0-10 cm, com teores de 31,5 e 59,8 mg de P kg⁻¹ de solo para o 50/50 e a lanço, respectivamente. Esses teores são bem superiores aos teores encontrados no controle (3,3 mg de P kg⁻¹ de solo). Nessa profundidade não é possível alcançar o fertilizante aplicado no sulco, o qual foi distribuído a 20-30 cm de profundidade e por isso os teores nesse modo de aplicação são menores. O teor de 59,8 mg kg⁻¹ P encontrado para a FNR a lanço foi significativamente superior ao teor de 4,5 mg kg⁻¹ observado para o ST nesta fração P-HCl.

A fonte reativa apresenta relativamente baixa solubilidade e o extrator ácido promove a dissolução de P que não estava solúvel no FNR (P-Ca), elevando os teores em relação ao fosfato solúvel. Esta fração não está totalmente disponível para absorção pelas plantas no curto prazo e vai depender das propriedades do solo, como acidez, capacidade de troca de cátions, concentrações de P no solo, concentração e atividade de Ca e de mecanismos da planta, como a liberação de ácidos orgânicos na rizosfera (ROBINSON; SYERS, 1990; SAGOE et al., 1998; HOCKING, 2001).

Os teores da fração lábil Pi-bic foram elevados, cerca de 2,6 e 5 vezes a mais para o ST quando a dose de 180 kg ha⁻¹ de P₂O₅ foi distribuída 50/50 e todo no sulco, respectivamente, em relação a aplicação a lanço e ao controle, na camada 10-20 cm (Figura 12B).

O FNR não diferiu do tratamento controle e nem influenciou a fração Pi-bic nos três modos de aplicação da adubação fosfatada. Os teores obtidos para essa fração não passaram dos 11 mg kg⁻¹ para o FNR, enquanto para o ST os teores foram 8,4 mg kg⁻¹ no lanço, 21,9 mg kg⁻¹ no 50/50 e 40,9 mg kg⁻¹ para o sulco. Os resultados refletem o grau de solubilidade das fontes.

Ambas as fontes elevaram os teores de P-inorgânico do solo na camada 10-20 cm, independentemente do modo de aplicação, exceto o ST quando foi distribuído a lanço (Figura 12C). Os dados destacam o baixo P-inorgânico total do solo, que variou de 96 mg kg⁻¹ no controle a 185 mg kg⁻¹ no ST distribuído no sulco.

Na figura 13 são apresentados os resultados do desdobramento da interação fonte x modo de aplicação para as frações Pi-bic, P-residual, P-não lábil e P-inorgânico da camada 20-40 cm. A fração Pi-bic teve seus valores alterados somente pelo ST quando o fertilizante foi aplicado total ou metade da dose no sulco (Figura 13A). No entanto, os teores não atingiram 15 mg de P kg⁻¹ de solo, bem menores que os encontrados na camada 10-20 cm,

indicando que a maior fração do fertilizante aplicado no sulco concentrou-se nesta camada superior.

O P-residual do solo na camada 20-40 cm não foi influenciado pela adubação fosfatada um ano após a sua adição (Figura 13B). O P dessa fração é composto por formas orgânicas e inorgânicas recalitrantes de P e não está disponível para ser absorvido pelas plantas no curto prazo (RODRIGUES et al., 2016). Maior quantidade de P-residual é consistente com solos altamente intemperizados, o P-total e o Pi solúvel em ácido (Ca-P) diminuem e as frações de Pi solúvel em meio alcalino (Al-P e Fe-P) aumentam, formando frações de Pi e Po mais estáveis química e fisicamente (SHARPLEY; TIESSSEN; COLE, 1987), o que não foi observado no presente estudo em função do pouco tempo de atividade agrícola da área onde está localizado o experimento.

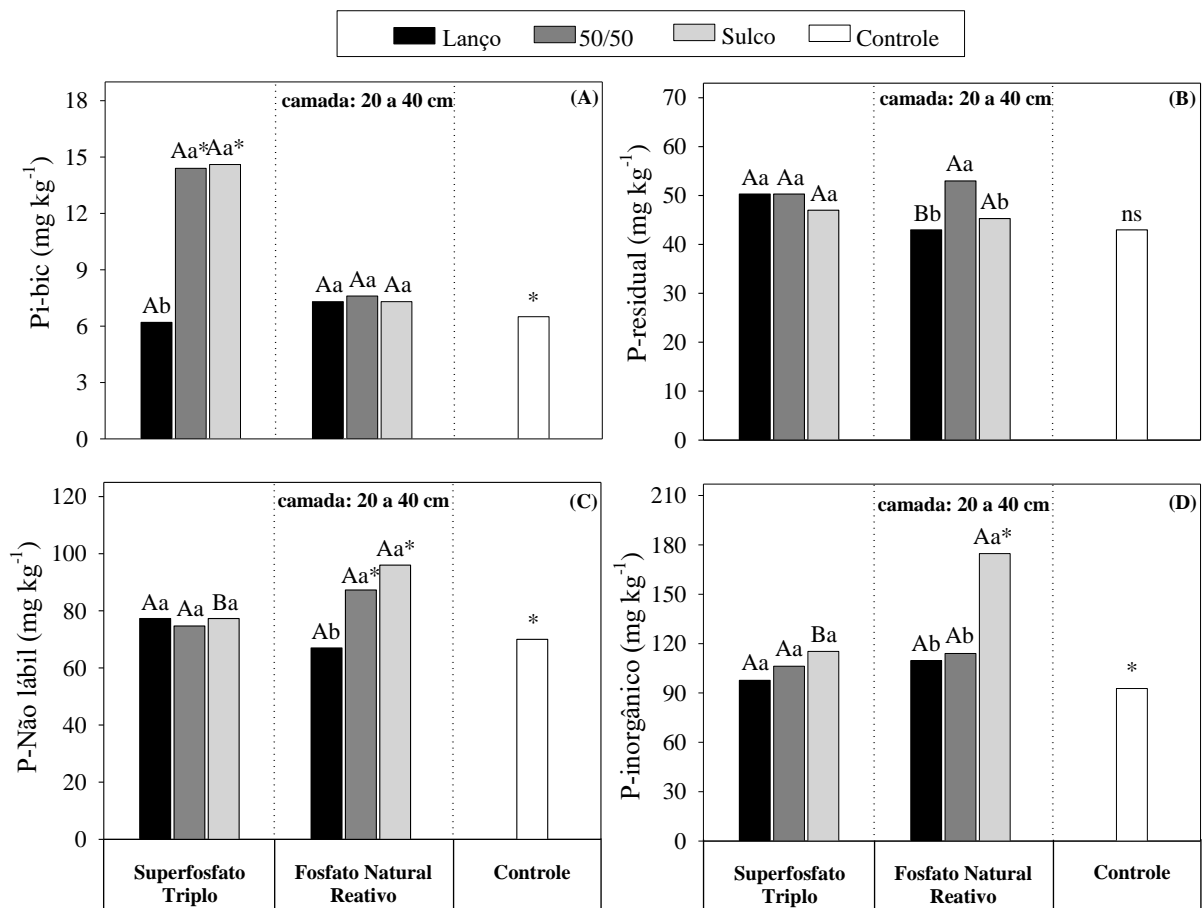


Figura 13. Desdobramentos das interações das frações de P da camada 20-40 cm de solo cultivado com cana-de-açúcar em fontes de fósforo e modos de aplicação da adubação fosfatada, Agudos 2014. Pi-bic (A), P-residual (B), P-não lábil (C) e P-inorgânico (D). Letras minúsculas comparam o modo de aplicação em cada fonte e maiúsculas comparam as fontes de P em cada modo de aplicação pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). * indica diferença entre os tratamentos avaliados e o tratamento controle pelo teste de Dunnett ($p < 0,05$).

Nestas condições de baixo pH e elevada atividade de Fe e Al, típico de solos altamente intemperizados, a solubilidade das formas de Pi secundário é largamente controlada pela mineralização do Po, sendo que 80% da variabilidade do P-resina é explicada pelo Po-bic. O mais estável Po hidróxido deveria se comportar como dreno, porque o conteúdo nessa fração está relacionado com a diminuição do P resina (TIESSSEN; STEWART; COLE, 1984).

b) Experimento de Agudos (Ano agrícola 2015)

Os resultados da análise de variância e os contrastes para comparação dos tratamentos com o controle no ano agrícola 2015 são apresentados na tabela 8. Por meio dos contrastes, pode-se observar que a adição de fertilizante fosfatado influenciou principalmente nas frações Pi-hid0.5, P-residual e o P-lábil (P-resina + Pi-bic + Po-bic) na camada de 0-10 cm, P-resina, Pi-hid0.1 e,consequentemente, o P-inorgânico na camada 10-20 cm e P-resina, P-HCl, Pi-hid0.5, P-residual, P-total e P-moderadamente lábil para a camada 20-40 cm. Houve efeito isolado da fonte para Pi-hid0.1 pelo teste F na camada 0-10 cm.

No entanto, não foram observadas diferenças entre as médias pelo teste LSD ($p \leq 0,05$) para tal fração, mas houve diferença para o Po-hid0.1 e para o P-inorgânico com teores de 51,2 e 170,6 mg de P kg^{-1} de solo no FNR comparado aos 26,5 e 133,1 mg de P kg^{-1} registrados para a fonte solúvel, respectivamente (Tabela 9). Os teores das frações lábeis P-resina, Pi-bic e P-inorgânico foram maiores no modo de aplicação a lanço ou 50/50. Para o Po-bic o modo de aplicação no sulco foi mais efetivo em elevar os teores dessa fração.

Na camada de 10-20 cm, o ST elevou os teores das frações Pi-bic, Pi-hido.1, Po-hid0.1, P-lábil e P-orgânico, enquanto o FNR elevou os teores Pi-hid0.5 e o P-inorgânico (Tabela 9). Os teores de P-resina, Pi-bic, Po-bic, P-total, P-lábil, P-moderadamente lábil e P inorgânico foram elevados quando o fertilizante foi distribuído metade (50/50) ou o total no sulco.

Na profundidade de 20-40 cm a fração Pi-bic foi superior com o ST em relação ao FNR (Tabela 9). Ao contrário, para o P-moderadamente lábil foi superior com o FNR em relação ao ST. A diferença é decorrente principalmente do P encontrado na fração P-HCl, cujo Ca-P é dissolvido nessa fração de extração. As frações Pi-bic, Po-bic e P-moderadamente lábil apresentaram a mesma tendência das camadas superiores (0-20 cm), com os teores sendo mais altos nos modos de aplicação 50/50 ou no sulco.

De forma geral, sem considerar a forma de coleta das amostras, que certamente não coincidirá com o local de amostragem de um ano para o outro, nota-se uma diminuição dos

Tabela 8. Análise de variância e contrastes de frações de fósforo em amostras de solo cultivado com cana-de-açúcar em diferentes fontes e modos de aplicação da adubação fosfatada, Agudos-SP, 2015.

Efeito	P-res	Pi-bic	Po-bic	Pi-hid 0.1	Po-hid 0.1	P-HCl	Pihid 0.5	Po-hid 0.5	P-resid	Ptot	P-labil	P-Mod lábil	P-Não lábil	P-inorg	P-org
Teste F - camada 0-10 cm															
Fonte (F)	ns	ns	ns	*	ns	*	ns	ns	ns	**	ns	**	ns	ns	ns
Modo (M)	*	ns	*	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*
FxM	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns	**	ns	**	ns	ns	*
CV%	49	35	9	10	3	17	15	11	5	10	28	3	2	3	6
Contraste															
C vs demais	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	***	<***	ns	**	ns	ns	ns	ns
C vs ST	ns	ns	ns	*	*	ns	ns	**	<***	ns	**	**	ns	ns	ns
C vs FNR	ns	ns	*	ns	ns	**	ns	***	<***	ns	**	**	ns	ns	ns
C vs lanço	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	<***	ns	*	ns	*	ns	ns
C vs 50/50	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns	***	<***	ns	*	ns	ns	ns	ns
C vs sulco	ns	ns	**	ns	ns	ns	ns	**	<***	ns	**	ns	ns	ns	ns
Teste F- camada 10-20 cm															
Fonte (F)	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Modo (M)	ns	ns	*	ns	ns	***	ns	ns	ns	*	*	*	ns	ns	ns
FxM	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns	**	ns	ns	ns	ns	ns	ns
CV%	48	3	4	8	12	25	15	25	6	16	28	41	12	19	7
Contraste															
C vs demais	***	ns	ns	**	ns	*	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns	**	Ns
C vs ST	***	**	ns	***	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns	Ns
C vs FNR	**	ns	ns	ns	ns	***	*	ns	*	*	ns	ns	ns	***	ns
C vs lanço	**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C vs 50/50	***	*	**	**	ns	**	ns	ns	ns	**	ns	*	ns	**	ns
C vs sulco	***	*	ns	**	ns	**	ns	ns	ns	*	**	ns	ns	**	ns
Teste F- camada 20-40 cm															
F	ns	*	ns	ns	ns	*	ns	ns	<***	ns	ns	*	ns	ns	ns
M	**	*	ns	ns	ns	*	*	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns
FxM	**	ns	ns	*	ns	**	**	ns	***	ns	*	ns	ns	ns	ns
CV%	16	34	25	19	31	23	10	7	3	17	26	5	3	4	6
Contraste															
C vs demais	***	*	ns	ns	ns	***	**	ns	<***	**	*	***	ns	*	ns
C vs ST	**	**	*	**	ns	ns	*	**	<***	ns	**	*	ns	ns	ns
C vs FNR	***	ns	ns	ns	ns	<***	**	ns	**	**	ns	<***	ns	*	ns
C vs lanço	*	ns	ns	ns	ns	**	ns	ns	<***	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C vs 50/50	**	*	*	*	ns	***	**	*	<***	*	*	**	ns	ns	ns
C vs sulco	<***	**	ns	*	ns	***	*	ns	<***	**	**	***	ns	*	ns

C = controle, ST = superfosfato triplo, FNR = fosfato natural reativo, 50/50 = metade da dose aplicada a lanço + metade da dose aplicada no sulco, CV = coeficiente de variação. <***, ***, **, * e ns significativos a menos de 0,1%, 0,1, 1, 5% e não significativo, respectivamente.

Tabela 9. Frações de fósforo em amostras de solo cultivado com cana-de-açúcar sob diferentes fontes e modos de aplicação da adubação fosfatada, Agudos-SP, 2015.

Tratamento	P-res	Pi-bic	Po-bic	Pi-hid 0.1	Po-hid 0.1	P-HCl	Pihid 0.5	Po-hid 0.5	P-resid	Ptot	P-lábil	P-Mod lábil	P-Não lábil	P-inorg	P-org	
camada 0-10 cm																
mg kg ⁻¹																
Controle		1,2	4,0	5,1	12,4	51,9	11,7	16,9	1,8	103	207	10,3	75,7	121,7	149,3	59,0
Fonte (F)	ST	1,7	6,4	14,8	19,2	26,5b	8,8	16,3	12,6	80	182	23,0	53,1b	109,2	133,1b	52,3b
	FNR	2,4	4,6	13,8	15,4	51,2a	47,7	18,5	15,3	82	246	20,7	115,6a	115,8	170,6a	81,4a
Modo (M)	Lanço	2,8a	6,5a	8,3b	17,7	36,9	44,9	17,9	8,9	80	222	17,5	99,5a	106,3	169,8a	53,7b
	50/50	2,4a	6,2ab	10,6b	19,4	39,5	27,8	17,1	19,1	83	225	19,2	86,5ab	118,8	155,8ab	69,0ab
	Sulco	1,0b	3,9b	24,0a	14,7	40,3	11,9	17,3	13,3	81	205	28,8	67,0b	112,3	129,8b	78,0a
camada 10-20 cm																
Controle	Sem P	1,1	5,1	9,6	12,3	60,7	5,6	18,0	10,8	87	210	15,7	78,7	116,7	130,0	81,0
Fonte (F)	ST	7,9	13,0a	7,1	25,8a	78,3a	8,9	18,4b	15,1	87	261	28,2a	113,1	121,6	161,2b	101,2a
	FNR	5,8	6,9b	6,6	16,9b	40,5b	68,9	23,9a	16,7	96	282	19,3b	125,8	136,9	218,4a	63,2b
Modo (M)	Lanço	4,2b	7,1b	6,7ab	18,2	39,3	18,7	19,0	14,4	95	222b	18,0b	76,3b	128,3	161,5b	60,7
	50/50	6,6ab	11,6a	3,6b	23,7	91,5	60,4	22,6	11,5	93	324a	22,0b	175,7a	127,0	217,8a	106,5
	Sulco	9,8a	11,2ab	10,3a	22,2	48,6	37,5	22,0	22,8	88	272ab	31,3a	108,3ab	132,3	190,2ab	81,5
camada 20-40 cm																
Controle		3,3	2,4	16,6	19,2	40,2	4,4	21,0	46,0	62	215	22,3	63,7	128,7	112,3	102,7
Fonte (F)	ST	12,1	5,2a	24,1	34,1	53,2	6,8	27,7	32,3	80	276	41,3	94,2b	140,1	166,0	109,7
	FNR	9,6	2,7b	19,7	20,2	76,9	52,6	29,9	48,3	66	326	32,1	149,8a	144,2	181,1	144,9
Modo (M)	Lanço	7,1	2,6b	21,5	20,6	44,7b	28,9	26,1	50,0	72	273	31,0	94,2b	148,2	157,3	116,2
	50/50	10,1	4,0a	23,6	29,5	74,5ab	26,8	31,9	31,4	74	306	37,5	130,8ab	137,0	176,0	129,3
	Sulco	15,5	5,5a	20,7	31,4	75,9a	33,5	28,5	39,6	73	324	41,7	141,0a	141,3	187,3	136,3

P-res = P extraído pela resina, Pi-bic e Po-bic = P inorgânico e orgânico extraído pelo bicarbonato (NaHCO₃ 0,5 M), respectivamente, Pi-hid 0.1 e Po-hid 0.1 = P inorgânico e orgânico extraído pelo hidróxido (NaOH 0,1 M), P-HCl = P extraído pelo ácido clorídrico (HCl 1 M), Pihid0.5 e Po-hid 0.5 = P inorgânico e orgânico extraído pelo hidróxido (NaOH 0,5 M), P-resid = P residual da amostra extraído com ácido sulfúrico e peróxido de hidrogênio após a sequência de extração. Ptot = P total (soma de todas as frações), P-lábil = (soma do P-res, Pi-bic e Po-bic), P-Mod = P moderadamente lábil = (soma de Pi-hid 0.1, Po-hid 0.1 e P-HCl), P-Não Lábil (soma de Pihid0.5, Po-hid 0.5 e P-resid), P-inorg = P inorgânico (P-res, Pi-bic, Pi-hid 0.1, P-HCl, Pi-hid 0.5 e P-resid), P-org = P orgânico, (Po-bic, Po-hid 0.1 e Po-hid 0.5). ST = superfosfato triplo, FNR = fosfato natural reativo, 50/50 = metade da dose aplicada no sulco e metade a lanço ambos no plantio. CV = coeficiente de variação. **, *, ns significativos a 1 e 5% e não significativo pelo teste F, respectivamente. Letras diferentes indicam que os tratamentos diferem pelo teste t (LSD) (p ≤ 0,05).

teores de P-lábil do solo entre a colheita da cana planta, agosto de 2014 (Tabela 7) e a colheita da primeira soca, agosto de 2015 (Tabela 9). A redução ocorreu principalmente nas frações lábeis inorgânicas P-resina e Pi-bic, e houve uma elevação no P-residual, P-total e P-não lábil. A diminuição do P das frações lábeis foi reflexo do maior rendimento e extração de P pela cana-de-açúcar no ciclo de cana soca (Tabela 4) e deve está também associada com a melhor condição hídrica ocorrida no segundo ciclo da cultura (Figura 2).

A interação fonte x modo de aplicação mostrou que a fração P-HCl é predominante nas três camadas avaliadas e com a mesma tendência para o FNR de apresentar teores bastante elevados em relação ao ST em função da sua maior concentração de P-Ca. Na camada mais superficial o predomínio é para o modo de aplicação a lanço, enquanto de 10-20 e 20-40 cm há uma tendência de equilíbrio ou um deslocamento para o modo de aplicação com parte (50/50) ou toda a dose aplicada no sulco (Figuras 14A e 15C).

O P-moderadamente lábil apresentou a mesma tendência de comportamento da fração P-HCl na camada 0-10 cm em função deste representar o somatório das frações Pi-hid0.1, Po-hid0.1 e P-HCl (Figura 14C). A eficiência agronômica de fosfato de menor solubilidade, geralmente, é menor no ano de aplicação, mas apresenta maior efeito residual que fontes solúveis, com maior eficiência agronômica nos anos subsequentes a sua aplicação (GHOSAL et al., 2003; SHIGAKI; SHARPLEY, 2011).

A interação fonte x modo de aplicação não diferiu do tratamento controle pelo teste de Dunnett ($p \leq 0,05$) para o P-total e nem para o P-orgânico na camada 0-10 cm (Figura 14B e 14D). O P-residual aumentou com a aplicação do fertilizante no sulco para o FNR em relação ao ST nesse mesmo modo de aplicação e ao tratamento controle, na camada 10-20 cm (Figura 14F). O comportamento do FNR para o P-residual não foi influenciado pelo modo de aplicação. Já o ST, quando foi aplicado no sulco de plantio, apresentou menor teor de P-residual que quando aplicado a lanço ou de forma mista (50/50), sendo similar ao controle em todos os modos de aplicação. No geral, o P-residual representou entre 30 e 50% do P total do solo.

Com exceção do ST a lanço, todas as outras interações fonte x modo de aplicação foram eficientes em elevar significativamente os teores de P-resina na camada 20-40 cm em relação ao controle (Figura 15A), quando comparados pelo teste de Dunnett ($p \leq 0,05$). Para a fração Pi-hid0.1, o ST também se mostrou eficiente em elevar os teores dessa fração quando aplicado no sulco ou 50/50. O FNR não diferiu do controle, mas na aplicação no sulco foi inferior ao ST (Figura 15B).

Essa fração é composta por formas de P ligadas a óxidos amorfos e cristalinos de Fe e Al e representa o principal reservatório de reposição do P-lábil absorvido pelas plantas e microrganismos (TIESSSEN; STEWART; COLE, 1984; CROSS; SCHLESINGER, 1995). Nos solos tropicais têm sido confirmado que a adição de fertilizantes inorgânicos eleva as concentrações das formas lábeis e moderadamente lábeis (PAVINATO et al., 2009; RODRIGUES et al., 2016; CHERUBIN et al., 2016).

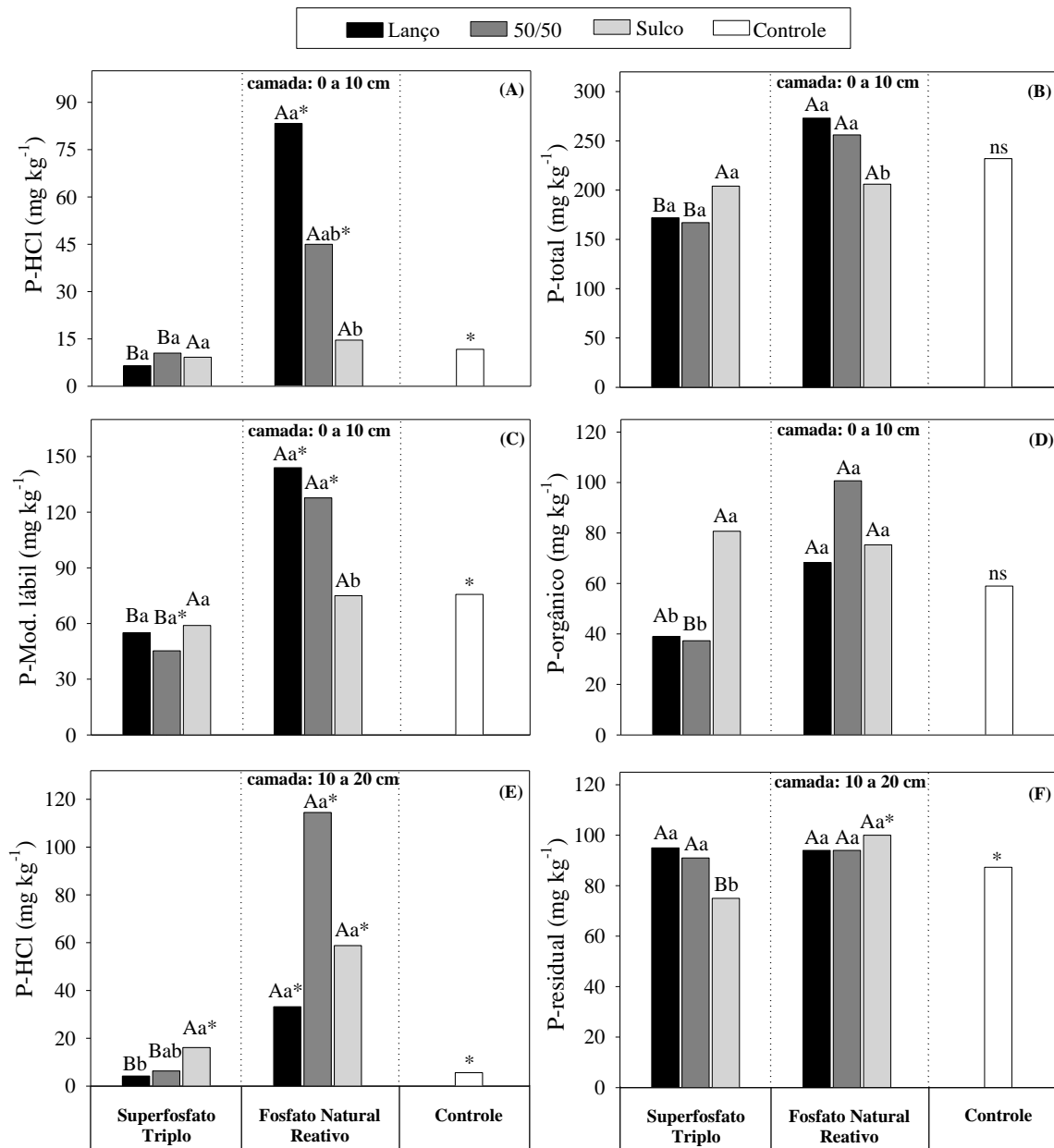


Figura 14. Desdobramentos das interações das frações de P da camada 0-10 e 10-20 cm de solo cultivado com cana-de-açúcar em fontes e modos de aplicação da adubação fosfatada, Agudos 2015. P-HCl (A), P-total (B), P-moderadamente lábil (C) e P-orgânico (D) 0-10 cm e P-HCl (E) e P-residual (F) 10-20 cm. Letras minúsculas comparam o modo de aplicação em cada fonte e maiúsculas comparam as fontes de P em cada modo de aplicação pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). * indica diferença entre os tratamentos avaliados e o tratamento controle pelo teste de Dunnett ($p < 0,05$).

Conte, Anghinoni e Rheinheimer (2003) avaliando as formas preferenciais de acumulação de P observaram aumento nas concentrações de Pi-hid0.1 com o aumento da dose de P aplicado, atingindo mais de 20% do P total do solo.

Houve aumento nos teores do P-residual na camada 20-40 cm quando o ST foi aplicado nos modos 50/50 ou todo no sulco em relação ao FNR nesses mesmos modos (Figura 15D).

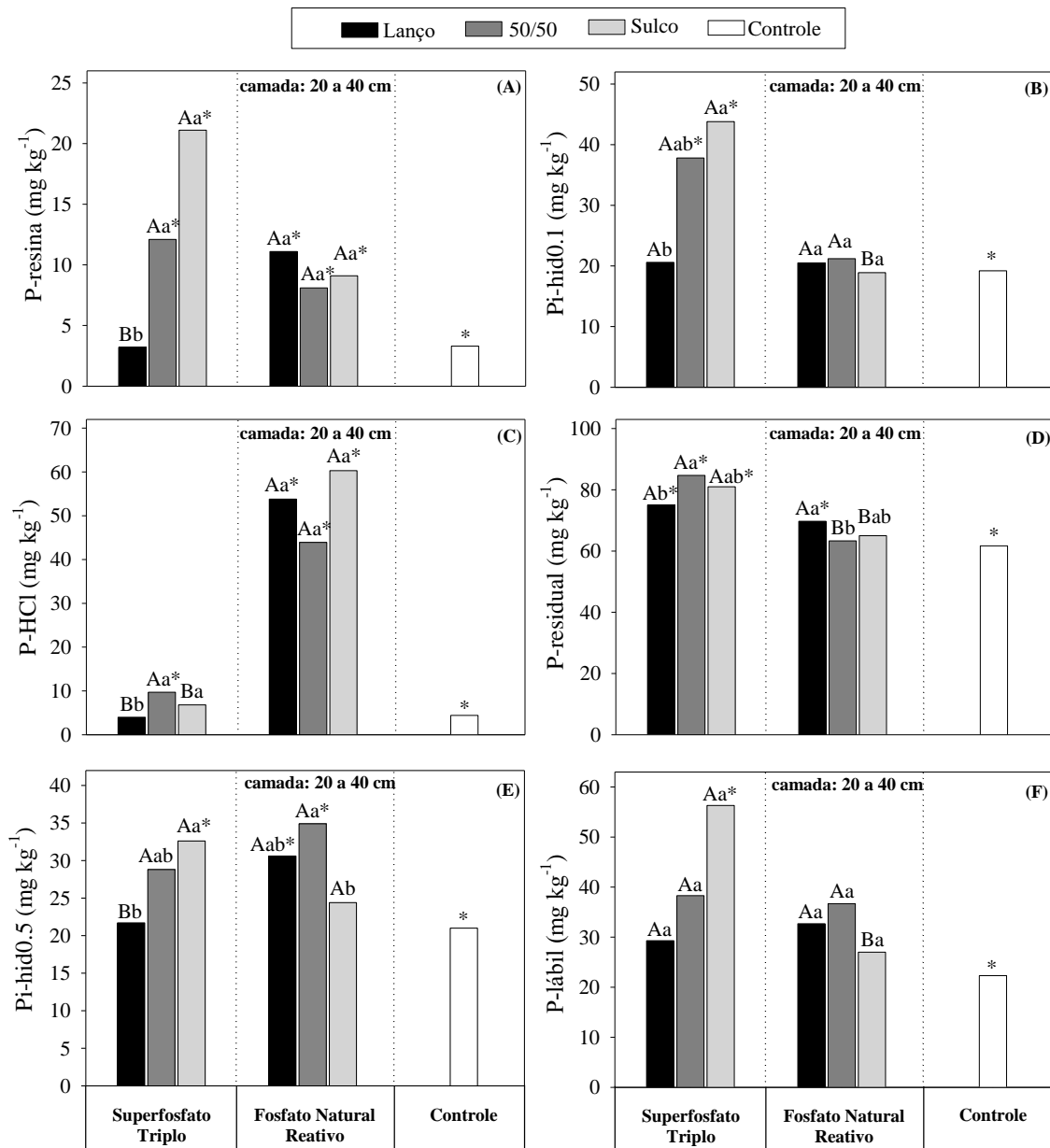


Figura 15. Desdobramentos das interações das frações de P da camadas 20-40 cm de solo cultivado com cana-de-açúcar em fontes de fósforo e modos de aplicação da adubação fosfatada, Agudos 2015. P-resina (A), Pi-hid0.1 (B), P-HCl (C), P-residual (D), Pi-hid0.5 (E) e P-lábil (F). Letras minúsculas comparam o modo de aplicação em cada fonte e maiúsculas comparam as fontes de P em cada modo de aplicação pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). * indica diferença entre os tratamentos avaliados e o tratamento controle pelo teste de Dunnett ($p < 0,05$).

Em relação ao controle, o ST nas três formas de aplicação e o FNR aplicado a lanço elevaram os teores dessa fração. As possíveis explicações para o FNR no modo de aplicação a lanço ter influência na camada 20-40 cm pode ser o deslocamento de P da superfície para camada mais profundas por meio das raízes, ou que, no momento da subsolagem e na abertura do sulco pode ter caído parte do fertilizante aplicado na superfície e a amostragem ter coincidido com esse local, ou ainda, este P pode ter sido solubilizado entre o período da colheita da cana planta e da cana soca. Isso não ocorreu para as outras frações, formas ou compartimentos de P para o ST e nem para o FNR, ao contrário, tendeu a manter teores menores nas profundidades de 10-20 e 20-40 cm (Tabelas 9).

A fração Pi-hid0.5, como parte do P-não lábil, foi incrementada pelas duas fontes após dois anos da adição do fertilizante em relação ao controle para o ST no sulco e para o FNR quando aplicado a lanço ou 50/50 (Figura 15 E). A interação fonte x modo de aplicação elevou os teores da fração P-lábil na camada de 20-40 cm (Figura 15 F). O ST distribuído no sulco de plantio apresentou teores de $56,3 \text{ mg kg}^{-1}$ e foi superior ao FNR com 27 mg kg^{-1} no mesmo modo de aplicação e ao controle, com teores de $22,3 \text{ mg de P kg}^{-1}$ de solo. Neste caso, cerca de 40% do P-lábil total foi representado pelo P-resina.

c) Experimento de Macatuba (Ano agrícola 2015)

As fontes fosfatadas utilizadas nesse estudo apresentaram efeito relativamente baixo nas frações de P do solo e, embora a análise de variância não tenha indicado efeito das fontes na camada 0-10 cm para a fração P-resina (Tabela 10), o teste LSD ($p \leq 0,05$) identificou diferenças para essa fração de P (Tabela 11). A fonte reativa foi mais efetiva em elevar os teores da fração lábil P-resina do que a fonte solúvel. Os teores de P-resina foram maiores no modo de aplicada a lanço, Po-bic e o P-lábil no sulco e lanço. P-total e P-moderadamente lábil foram coerentes com o modo de aplicação, onde 50/50 ou toda dose a lanço permaneceram mais na camada superficial, enquanto para o Pi-hid0.5 a aplicação a lanço diferiu apenas do 50/50.

Na camada 10-20 cm houve diferenças entre as fontes para várias das frações avaliadas (Tabela 11). O FNR elevou os teores de Pi-bic, P-HCl, Po-hid0.5 e P-moderadamente lábil em comparação com o ST. O modo de aplicação no sulco foi mais efetivo que os demais em elevar os teores do Pi-bic, P-HCl, P-total, P-moderadamente lábil, P-não lábil, P-inorgânico e P-orgânico e Po-hid0.5, sendo este último apenas superior a aplicação a lanço.

Tabela 10. Análise de variância e contrastes de frações de fósforo em amostras de solo cultivado com cana-de-açúcar sob diferentes fontes e modos de aplicação da ad fosfatada, Macatuba-SP, 2015

Efeito	P-res	Pi-bic	Po-bic	Pi-hid 0.1	Po-hid 0.1	P-HCl	Pihid 0.5	Po-hid 0.5	P-resid	Ptot	P-labil	P-Mod lábil	P-Não lábil	P-inorg	P-org
Teste F - camada 0-10 cm															
Fonte (F)	ns	*	ns	ns	ns	**	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Modo (M)	**	*	***	ns	ns	**	*	ns	***	**	<***	*	**	**	ns
FxM	ns	*	ns	ns	ns	**	ns	ns	***	ns	ns	ns	*	**	ns
CV%	18	6	24	6	20	19	4	21	8	8	14	15	10	7	13
Contraste															
C vs demais	***	*	ns	ns	ns	***	ns	ns	ns	ns	*	*	ns	ns	*
C vs ST	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*
C vs FNR	***	***	ns	ns	ns	<***	ns	ns	ns	ns	**	*	ns	ns	*
C vs lanço	<***	**	*	ns	ns	<***	ns	*	ns	ns	***	*	ns	ns	**
C vs 50/50	ns	*	ns	ns	ns	*	ns	*	*	ns	ns	*	*	*	*
C vs sulco	**	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**	ns	ns	ns	ns
Teste F - camada 10-20 cm															
Fonte (F)	ns	ns	ns	*	ns	*	*	**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Modo (M)	<***	*	*	ns	ns	ns	ns	*	ns	***	<***	**	*	**	*
FxM	***	ns	*	ns	*	ns	*	ns	ns	ns	<***	ns	ns	ns	ns
CV%	9	32	17	24	3	21	16	8	14	10	3	17	9	12	3
Contraste															
C vs demais	<***	***	*	**	ns	ns	*	ns	ns	ns	<***	***	ns	ns	ns
C vs ST	<***	**	**	**	ns	ns	**	ns	ns	ns	<***	**	ns	ns	ns
C vs FNR	<***	***	ns	*	ns	*	*	ns	ns	ns	<***	***	ns	ns	ns
C vs lanço	**	**	ns	**	ns	ns	*	ns	ns	ns	***	**	ns	ns	ns
C vs 50/50	**	**	*	*	*	ns	*	ns	ns	ns	<***	*	ns	ns	ns
C vs sulco	<***	<***	**	**	ns	*	*	ns	ns	***	<***	<***	ns	*	**
Teste F - camada 20-40 cm															
F	ns	ns	ns	ns	*	**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
M	ns	ns	**	ns	ns	*	*	ns	ns	ns	**	**	ns	ns	ns
FxM	ns	ns	**	ns	ns	**	ns	ns	ns	ns	***	ns	ns	ns	ns
CV%	50	36	14	16	19	7	17	34	27	13	15	10	8	8	21
Contraste															
C vs demais	***	ns	ns	ns	**	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C vs ST	***	*	ns	*	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C vs FNR	***	ns	ns	ns	**	**	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C vs lanço	**	ns	ns	ns	**	ns	**	ns	ns	ns	ns	**	ns	ns	ns
C vs 50/50	***	ns	ns	ns	*	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C vs sulco	***	*	ns	ns	ns	**	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns

C = controle, ST = superfosfato triplo, FNR = fosfato natural reativo, 50/50 = metade da dose aplicada a lanço + metade da dose aplicada no sulco, CV = coeficiente de variação. <***, ***, **, * e ns significativos a menos de 0,1%, 0,1, 1, 5% e não significativo, respectivamente.

Tabela 11. Frações de fósforo em amostras de solo cultivado com cana-de-açúcar sob diferentes fontes e modos de aplicação da adubação fosfatada, Macatuba-SP, 2015.

Tratamento	P-res	Pi-bic	Po-bic	Pi-hid 0.1	Po-hid 0.1	P-HCl	Pihid 0.5	Po-hid 0.5	P-resid	Ptot	P-lábil	P-Mod lábil	P-Não lábil	P-inorg	P-org	
camada 0-10 cm																
-----mg kg ⁻¹ -----																
Controle	4,6	1,6	17,9	20,2	98,2	10,2	39,7	60,9	411	664	24,0	128,7	511,3	486,7	177,0	
Fonte (F)	ST	7,7b	1,7	22,5	19,7	114,5	12,2	39,7	75,6	437	731	31,9	146,3	552,4	517,6	212,4
	FNR	10,1a	5,2	22,5	19,9	125,9	25,9	42,7	77,1	410	739	37,8	171,8	529,7	513,8	225,6
Modo (M)	Lanço	11,8a	4,0	28,4a	21,9	124,1	25,9	45,7a	84,9	411	758a	44,2a	172,0a	541,3	520,5	237,3
	50/50	6,6b	3,6	11,0b	20,2	136,7	16,4	35,6b	81,7	476	788a	21,2b	173,5a	593,2	558,3	229,7
	Sulco	8,3b	2,7	28,1a	17,3	103,6	14,8	42,2ab	63,9	383	664b	39,2a	135,8b	489,2	468,2	195,5
camada 10-20 cm																
Controle	Sem P	3,6	0,8	12,7	15,9	106,2	9,3	38,5	65,2	457	710	17,3	131,3	561,0	525,0	184,0
Fonte (F)	ST	25,3	2,4b	20,9	28,9	135,9	12,9b	55,1	59,3b	439	779	48,7	177,8b	553,0	563,3	216,0
	FNR	18,3	3,1a	15,7	22,5	123,5	96,9a	49,7	88,9a	385	803	37,0	243,0a	523,4	575,1	228,0
Modo (M)	Lanço	11,3	2,3b	14,7	24,5	127,0	31,7b	53,8	52,9b	401	719b	28,2	183,3b	507,3b	524,3b	194,5b
	50/50	10,8	2,1b	18,5	21,6	118,3	31,9b	51,4	66,6ab	384	705b	31,3	171,8b	502,0b	501,5b	203,3b
	Sulco	43,3	4,2a	22,0	31,4	145,3	118,7a	52,1	102,9a	451	970a	70,2	295,3a	605,8a	700,3a	270,3a
camada 20-40 cm																
Controle		2,9	2,7	26,3	21,7	104,3	16,0	45,9	86,1	350	656	32,0	142,3	482,0	439,3	217,0
Fonte (F)	ST	15,0	7,5	30,3	33,8a	78,4	10,0	58,3	134,5	329	697	53,9	122,2	521,4	453,3	244,4
	FNR	6,9	3,8	32,4	24,1b	70,6	29,6	60,4	111,7	337	677	43,2	124,1	509,3	460,8	214,4
Modo (M)	Lanço	5,4	3,6	30,5	26,0	65,2	16,1	72,0a	89,3	339	647	39,3	107,2b	500,2	461,7	185,0b
	50/50	10,1	5,3	24,0	31,0	74,6	13,2	57,1ab	144,4	335	695	39,8	119,2b	536,8	452,3	244,3a
	Sulco	17,3	8,1	40,2	29,9	83,8	27,4	49,0b	131,8	325	713	65,5	141,0a	506,2	457,2	255,5a

P-res = P extraído pela resina, Pi-bic e Po-bic = P inorgânico e orgânico extraído pelo bicarbonato (NaHCO₃ 0,5 M), respectivamente, Pi-hid 0.1 e Po-hid 0.1 = P inorgânico e orgânico extraído pelo hidróxido (NaOH 0,1 M), P-HCl = P extraído pelo ácido clorídrico (HCl 1 M), Pihid0.5 e Po-hid 0.5 = P inorgânico e orgânico extraído pelo hidróxido (NaOH 0,5 M), P-resid = P residual da amostra extraído com ácido sulfúrico e peróxido de hidrogênio após a sequência de extração. Ptot = P total (soma de todas as frações), P-lábil = (soma do P-res, Pi-bic e Po-bic), P-Mod = P moderadamente lábil = (soma de Pi-hid 0.1, Po-hid 0.1 e P-HCl), P-Não Lábil (soma de Pihid0.5, Po-hid 0.5 e P-resid), P-inorg = P inorgânico (P-res, Pi-bic, Pi-hid 0.1, P-HCl, Pi-hid 0.5 e P-resid), P-org = P orgânico, (Po-bic, Po-hid 0.1 e Po-hid 0.5). ST = superfosfato triplo, FNR = fosfato natural reativo, 50/50 = metade da dose aplicada no sulco e metade a lanço ambos no plantio. CV = coeficiente de variação. **, *, ns significativos a 1 e 5% e não significativo pelo teste F, respectivamente. Letras diferentes indicam que os tratamentos diferem pelo teste t (LSD) (p ≤ 0,05).

Os teores de Pi-hid0.1 foram maiores para o ST que para o FNR na camada 20-40 cm. Em relação ao modo de aplicação, os teores de Pi-hi0.5 foram maiores a lanço que no sulco. O sulco foi mais efetivo que os outros dois modos em elevar os teores do P-moderadamente lábil e a forma P-orgânico foi favorecida pela aplicação do fertilizante total ou parcial no sulco (Tabela 11).

Analisando-se os contrastes comparativos entre controle e os diferentes tratamentos apresentados na tabela 10, observa-se que a adubação fosfatada teve efeito significativo na elevação dos níveis de P do solo nas três camadas avaliadas, com maior intensidade na camada 10-20 cm. Na camada superficial (0-10 cm) a influência foi mais expressiva para as frações lábeis P-resina e Pi-bic e para a fração ácida P-HCl, influenciadas pelo FNR e pelo modo de aplicação a lanço, conforme a significância do contraste.

Na camada 10-20 cm a adição de fertilizante ao solo ampliou o efeito dos tratamentos, avançando pelas formas lábeis (P-resina, Pi-bic, Po-bic), moderadamente lábil (Pi-hid0.1) e não lábil (Pi-hid0.5). As frações P-resina e Po-hid0.1 foram mais afetadas pela adubação em comparação ao controle na camada 20-40 cm. Essas alterações são reflexos da amostragem feita no sulco e do fato do fertilizante concentrar-se nessas camadas quando a aplicação foi realizada no sulco de plantio.

A adição de fertilizante ao solo promove inicialmente o aumento nas frações mais lábeis como P-resina, Pi-bic e P-hid. Essas frações tendem para um equilíbrio no solo, pois quando ocorre uma diminuição no P-resina promovida pela absorção de P pelas raízes das plantas, há rápida reposição pelas frações de P-bicarbonato e P-hidróxido (SCHMIDT; BUOL; KAMPRATH, 1997).

Os desdobramentos da interação entre fonte x modo de aplicação mostram que o FNR foi capaz de elevar os teores de Pi-bic na camada 0-10 cm, independentemente do modo de aplicação utilizado (Figura 16A). Para o ST, o modo de aplicação a lanço diferiu do sulco. Esta fonte não diferiu do controle e foi inferior ao FNR nos modo lanço e 50/50.

A fração P-HCl reflete a solubilidade das fontes, com o modo de aplicação a lanço diferindo dos outros dois métodos para FNR e do ST a lanço. O controle foi semelhante ao ST e foi superado pelo FNR, independente do método de aplicação pelo teste de Dunnett ($p \leq 0,05$) na camada 0-10 cm (Figura 16B). O P-residual e o P-não lábil tiveram comportamento idênticos, mudando apenas em magnitude de teores porque o P-não lábil engloba além do P-residual, o Pi-hid0.5 e o Po-hid0.5. Em ambos, o ST no modo 50/50 foi superior aos outros dois modos e ao FNR independente do modo de aplicação, aumentando o

residual em relação ao controle. A semelhança de comportamento é devido ao P-residual representar cerca de 80% do P-não lábil nessa camada (Figura 16C e 16D).

Para a fonte ST, o modo 50/50 foi superior ao a lanço e ao sulco no aumento do P-inorgânico e foi também superior ao FNR no mesmo modo de aplicação e ao controle (Figura 16 E). Na fonte FNR o lanço aumentou o P-inorgânico em relação ao sulco e diferiu do ST para o lanço e o sulco.

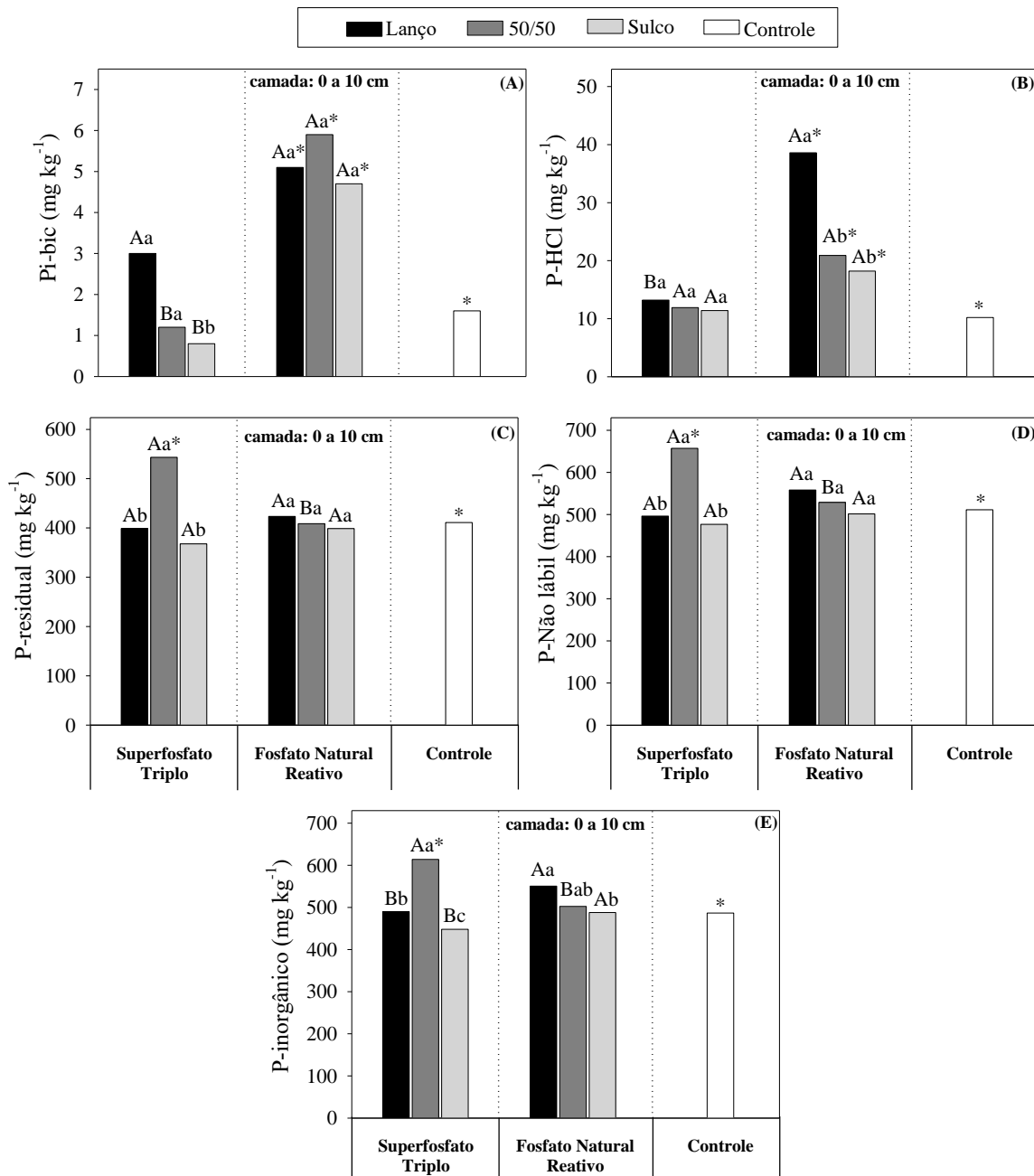


Figura 16. Desdobramentos das interações das frações de P da camada 0-10 cm de solo cultivado com cana-de-açúcar em fontes de fósforo e modos de aplicação da adubação fosfatada, Macatuba 2015. Pi-bic (A), P-HCl (B), P-residual (C), P-não lábil (D) e P-inorgânico (E). Letras minúsculas comparam o modo de aplicação em cada fonte e maiúsculas comparam as fontes de P em cada modo de aplicação pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). * indica diferença entre os tratamentos avaliados e o tratamento controle pelo teste de Dunnett ($p < 0,05$).

As frações P-resina, Po-bic e como consequência o P-lábil tiveram grande incremento com o ST aplicado no sulco se comparado com o FNR (Figura 17A, 17B e 17E). A fonte solúvel no sulco conseguiu elevar os teores de P-resina e o P-lábil de forma expressiva quando comparado com os outros dois modos de aplicação e com o FNR no sulco de plantio. Os teores foram de $62,6 \text{ mg kg}^{-1}$ para o ST lanço contra 24 mg kg^{-1} do FNR no mesmo modo.

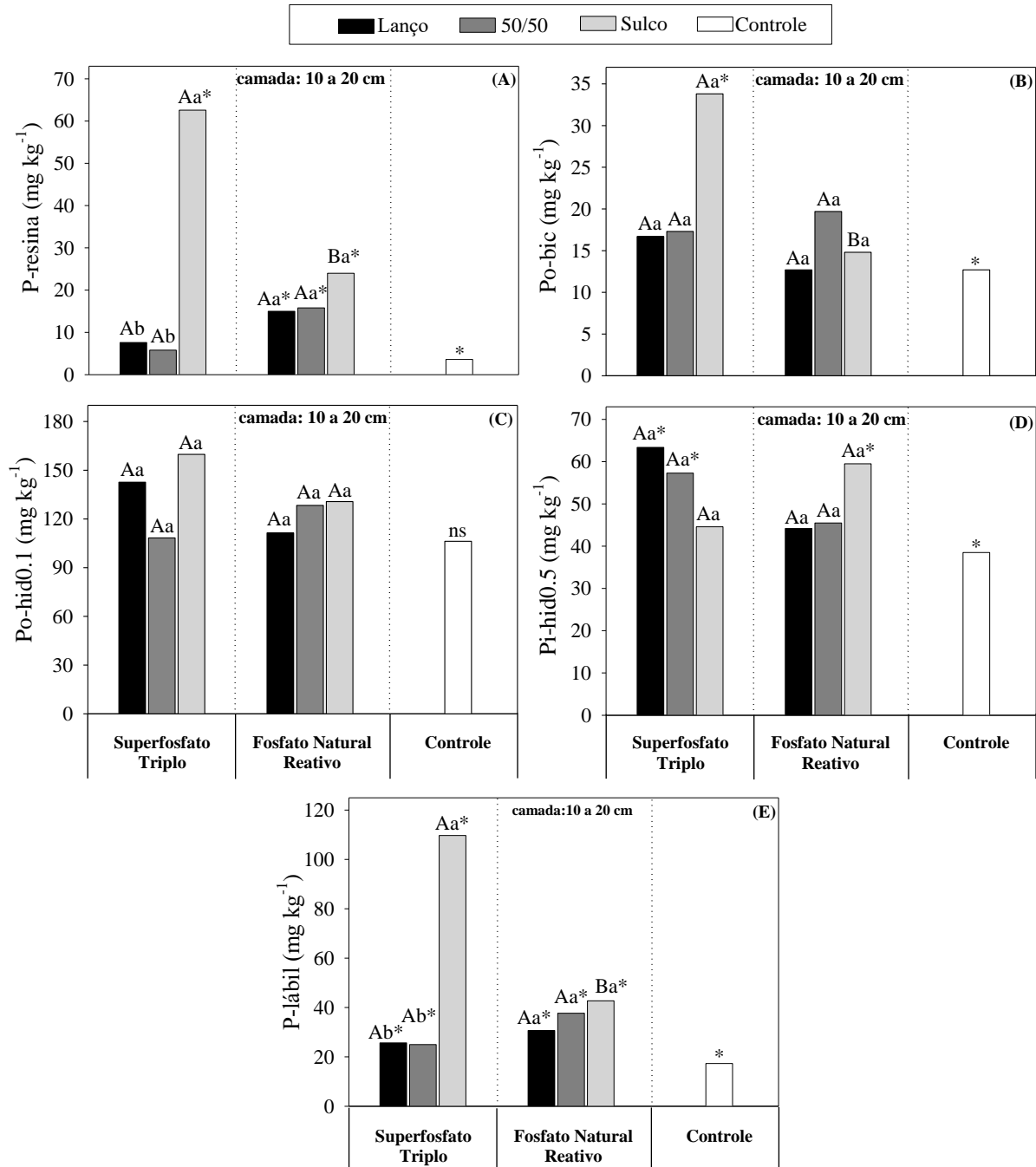


Figura 17. Desdobramentos das interações das frações de P da camada 10-20 cm de solo cultivado com cana-de-açúcar em fontes de fósforo e modos de aplicação da adubação fosfatada, Macatuba 2015. P-resina (A), Po-bic (B), Po-hid0.1 (C), Pi-hid0.5 (D) e P-lábil (E). Letras minúsculas comparam o modo de aplicação em cada fonte e maiúsculas comparam as fontes de P em cada modo de aplicação pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). * indica diferença entre os tratamentos avaliados e o tratamento controle pelo teste de Dunnett ($p < 0,05$).

Para o P-lábil, os teores foram de 109,7 e 42,7 mg kg⁻¹, respectivamente (Figura 17E). Esses expressivos teores observados são importantes, principalmente para a fonte solúvel, pois a amostragem foi realizada um ano após a adição do fertilizante e por se tratar de um solo de alta capacidade de sorção de P (Tabela 1) a tendência seria que o P do fertilizante fosse convertido em formas de P mais estáveis por meio das reações de precipitação e adsorção aos minerais do solo (OHNO; HIRADATE; HE, 2011; WANG et al., 2014).

Os teores da fração Po-bic foram de 33,8 para o ST, superiores aos 14,8 mg de P kg⁻¹ de solo obtido pelo FNR e 12,7 mg de P kg⁻¹ de solo do tratamento controle (Figura 17B). A interação para as frações Po-hid0.1 e Pi-hid0.5 não apresentaram diferenças pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$) para os tratamentos. Apenas a fração Pi-hid0.5 diferiu do controle pelo teste de Dunnett ($p \leq 0,05$) para a fonte ST a lanço e 50/50 e o FNR aplicado no sulco (Figura 17C e 17D).

Os desdobramentos das interações para a camada 20-40 cm estão apresentados na figura 18. Não houve influência do modo de aplicação da adubação fosfatada para a fração Po-bic na fonte solúvel. A distribuição do FNR 50/50 apresentou menores teores de Po-bic que os outros modos para essa fonte e a fonte ST para o respectivo modo de aplicação (Figura 18A). Os tratamentos não diferiram do controle. Como esperado, para a fonte reativa foi registrado grande incremento na fração P-HCl na aplicação no sulco, diferindo dos outros dois modos e da fonte solúvel no modo a lanço pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$) e do controle pelo teste de Dunnett ($p \leq 0,05$). O modo de aplicação não interagiu com a fonte solúvel, no entanto, no modo de aplicação a lanço, os teores foram menores do que na fonte reativa (Figura 18B).

A fonte solúvel (ST) elevou os teores do P-lábil quando o fertilizante foi aplicado no sulco em comparação a forma de aplicação a lanço, com teores de 77,7 e 31,3 mg P kg⁻¹ de solo, respectivamente, diferindo também do controle. Os modos de aplicação não interagiram com a fonte reativa FNR (Figura 18C).

O solo do experimento de Macatuba possui uma textura muito argilosa, que associada com suas características mineralógicas faz dele um solo com alta capacidade de sorção de P. A capacidade de máxima adsorção de P deste solo foi superior a 1500 mg kg⁻¹ de solo, antes da instalação desse experimento (Tabela 1). Essa quantidade deveria ser bem menor, considerando-se que essa área vem sendo cultivada com cana-de-açúcar por longos períodos e ter recebido adição de fertilizantes fosfatados a cada renovação do canavial. Essa sequência de fertilização pode ter diminuído a energia de adsorção desse solo e permitiu que a fonte solúvel apresentasse boas quantidades de P em frações lábeis e moderadamente lábeis.

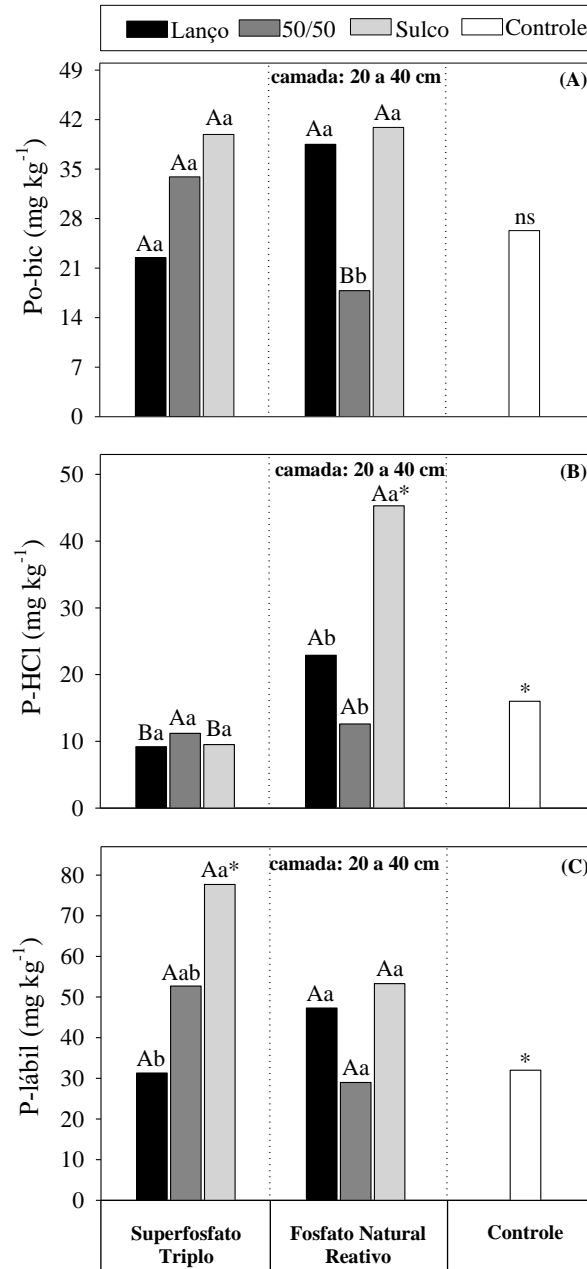


Figura 18. Desdobramentos das interações das frações de P da camada 20-40 cm de solo cultivado com cana-de-açúcar em fontes de fósforo e modos de aplicação da adubação fosfatada, Macatuba 2015. Po-bic (A), P-HCl (B) e P-lábil (C). Letras minúsculas comparam o modo de aplicação em cada fonte e maiúsculas comparam as fontes de P em cada modo de aplicação pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). * indica diferença entre os tratamentos avaliados e o tratamento controle pelo teste de Dunnett ($p < 0,05$).

Tem sido observado que aplicações anteriores de fosfato devem aumentar as reservas do nutriente no solo e também melhorar a eficiência da adubação fosfatada das aplicações subsequentes (BARROW; BOLLAND; ALLEN, 1998). He et al. (1994) observaram que houve um decréscimo na produção de massa seca e na concentração de P no tecido de plantas de arroz após 3 meses de cultivo com a diminuição da saturação de sorção dos minerais do solo.

2.4 Considerações finais / Conclusões

De forma geral, foram mantidas as tendências esperadas das duas distintas fontes de P durante os dois anos de experimento em Agudos e na cana planta de Macatuba. O comportamento das fontes refletiram a sua solubilidade.

Não houve diferença entre as fontes, modos de aplicação da adubação fosfatada e nem da interação para a produtividade de colmos industrializáveis, açúcar total recuperável e toneladas de pol por hectare nos ciclos de cana planta e primeira soca em Agudos e na cana planta de Macatuba.

A adição de fertilizante fosfatado aumentou a produtividade de colmos industrializáveis, açúcar total recuperável e toneladas de pol por hectare no segundo ciclo de cultivo na área de expansão de Agudos.

A fonte solúvel, manteve mais P nas formas lábeis Pi-bic e P-resina e na moderadamente lábil Pi-hid0.1 do que a fonte reativa, que acumulou mais P principalmente na forma de P-Ca na duas áreas estudadas.

A baixa solubilidade do fosfato reativo não foi fator limitante para o rendimento agrícola e industrial da cana-de-açúcar. A fonte manteve quantidades menores de P lábil do que a fonte solúvel, mas suficientes para atender a demanda da planta.

Os modos de aplicação alteram as formas de P do solo com melhor eficiência da fonte solúvel no sulco e da reativa em maior contato com o solo. Na área estabelecida com cana-de-açúcar por décadas, as reservas de P do solo foram suficientes para suprir adequadamente a cana-planta.

A continuidade das avaliações por mais ciclos de cultivos é importante para se obter informações mais consistentes sobre o efeito do manejo das fontes de fósforo em diferentes modos de aplicação nas formas de P do solo e na produtividade da cultura nas áreas de expansão e estabelecidas.

Referências

ALMEIDA, D.S.; ROSOLEM, C.A. Ruzigrass grown in rotation with soybean increases soil labile phosphorus. **Agronomy Journal**, Madison, v.108, n.6, p.1-9, 2016.

ANGHINONI, I.; BARBER, S.A. Phosphorus application rate and distribution in the soil and phosphorus uptake by corn. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v.44, p.1041-1044, 1980.

- ARROBAS, M.; CLARO, A.M.; FERREIRA, I.Q.; RODRIGUES, M.A. The effect of legume species grown as cover crops in olive orchards on soil phosphorus bioavailability. **Journal of Plant Nutrition**, London, v.38, n.14, p.2294–2311, 2015.
- BARROW, N.J.; BOLLAND, M.D.A.; ALLEN, D.G. Effect of previous additions of superphosphate on sorption of phosphate. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v.36, n.3, p.359-72, 1998.
- BORKERT, C.M.; BARBER, S.A. Soybean shoot and root growth and phosphorus concentration as affected by phosphorus placement. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v.49, p.152-155, 1985.
- BOKHTIAR, S.M.; SAKURAI, K. Effect of application of inorganic and organic fertilizers on growth, yield and quality of sugarcane. **Sugar Tech**, New Delhi, v.7, n.7, p.33-37, 2005.
- BOX, G.E.P.; COX, D.R. An analysis of transformations, **Journal of the Royal Statistical Society**, London, Series B, v.26, n.2, p.211-252, 1964.
- BROOKES, P.C.; POWLSON, D.S. Preventing phosphorus losses during perchloric acid digestion of sodium bicarbonate soil extracts. **Journal of Science and Food Agriculture**, London, v 32, n.7, p. 671-674, 1981.
- CAIONE, G.; PRADO, R.M.; CAMPOS, C.N.S.; MODA, L.R.; VASCONCELOS, R.L.; PIZAURO JÚNIOR, J.M. Response of sugarcane in a red ultisol to phosphorus rates, phosphorus sources, and filter cake. **The Scientific World Journal**, Cairo, v.2015, Article ID 405970, 10 p. 2015. doi:10.1155/2015/405970. <http://dx.doi.org/10.1155/2015/405970>
- CAIONE, G.; PRADO, R.M.; CAMPOS, C.N.S.; RODRIGUES, M.; PAVINATO, P.S.; AGOSTINHO, F.B. Phosphorus fractionation in soil cultivated with sugarcane fertilized by filter cake and phosphate sources. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Philadelphia, v.46, n.19, p.2449-2459, 2015.
- CENTRO DE TECNOLOGIA CANAVIEIRA – CTC. Revista variedades CTC 2013. Disponível em: <http://www.ctcanavieira.com.br/downloads.html>. Acesso em: 11 mai. 2016.
- CHERUBIN et al. Phosphorus pools responses to land-use change for sugarcane expansion in weathered Brazilian soils. **Geoderma**, Amsterdam, v.265, p.27-38, 2016.
- CHIEN, S.H.; PROCHNOW, L.I.; TU, S.; SNYDER, C.S. Agronomic and environmental aspects of phosphate fertilizers varying in source and solubility: an update review. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v.89, p.229-255, 2011.
- CHIEN, S.H.; SIKORA, F.J.; GILKES, R.J.; MCLAUGHLIN, M. J. Comparing of the difference and balance methods to calculate percent recovery of fertilizer phosphorus applied to soils: a critical discussion. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v.92, n.1, p.1-8, 2012.
- CONDON, L.M.; GOH, K.M.; NEWMAN, R.H. Nature and distribution of soil phosphorus as revealed by a sequential extraction method followed by ³¹P nuclear magnetic resonance analysis. **Journal of Soil Science**, Oxford, v.36, p.199-207, 1985.

CONSECANA – Conselho dos Produtores de Cana-de-Açúcar, Açúcar e Álcool do Estado de São Paulo. **Manual de instruções**. 5.ed. Piracicaba, 2006. 111p.

CONTE, E.; ANGHINONI, I.; RHEINHEIMER, D.S. Frações de fósforo acumuladas em latossolo argiloso pela aplicação de fosfato no sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência Solo**, Viçosa, v.27, p.893-900, 2003.

COOPERBAND, L.R.; GALE, P.M.; COMERFORD, N.B. Refinement of the anion exchange membrane method for soluble phosphorus measurement. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v.63, n.1, p.58-64, 1999.

CORDELL, D.; NESET, T.S.S. Phosphorus vulnerability: a qualitative framework for assessing the vulnerability of national and regional food systems to the multi-dimensional stressors of phosphorus scarcity. **Global Environmental Change**, Amsterdam, v.24, p.108-122, 2014.

CROSS, A.F.; SCHLESINGER, W.H. A literature review and evaluation of the Hedley fractionation: applications to the biogeochemical cycle of soil phosphorus in natural ecosystem. **Geoderma**, Amsterdam, v.64, p.197-214, 1995.

DICK, W. A.; TABATABAI, M. A. Determination of orthophosphate in aqueous solutions containing labile organic and inorganic phosphorus compounds. **Journal Environmental Quality**, Madison, v. 6, n.1, p.82-85, 1977.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema Brasileiro de Classificação do solo**. 3.ed.. Brasília: EMBRAPA, 2013. 353p.

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C.; LI, Y. C. The role of nutrient efficient plants in improving crop yields in the twenty first century. **Journal of Plant Nutrition**, London, v.31, n.6, p.1121-1157, 2008.

GHOSAL, P.K.; CHAKRABORTY, T.; BHATTACHARYA, B.; BAGCHI, D.K. Relative agronomic effectiveness of phosphate rocks and P adsorption characteristics of an Oxic Rhodustalf in Eastern India. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Rostock, v. 166, p.750-755, 2003.

GIKONYO, E.W.; ZAHARAH, A.R.; HANAFI, M.M. Extractable Bray-1 phosphorus and crop yields as influenced by addition of phosphatic fertilizers of various solubilities integrated with manure in an acid soil. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v.88, n.1, p.79-90, 2010.

GOH, K.M.; CONDRON, L. M. Plant availability of phosphorus accumulated from long-term applications of superphosphate and effluent to irrigated pastures. **New Zealand Journal of Agricultural Research**, London, v.32, p.45-51, 1989.

GOPALASUNDARAM, P.; BHASKARAN, A.; RAKKIYAPPAN, P. Integrated nutrient management in sugarcane. **Sugar Tech**, New Delhi, v.14, n.1, p.3–20, 2012.

GUO, H.C.; ZHANG, Q.C.; WANG, G.H.; CHIEN, S.H. Phosphorus fractions of soils treated with phosphate rock and monocalcium phosphate after ryegrass growth. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Philadelphia, v.42, p.93-99, 2011.

HE, Z.L.; YANG, X.; YUAN, K.N.; ZHU, Z.X. Desorption and plant-availability of phosphate sorbed by some importante minerals. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.162, p.89-97, 1994.

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

HOCKING, P. Organic acids exuded from roots in phosphorus uptake and aluminum tolerance of plants in acids soils. **Advances in Agronomy**, San Diego, v.74, p.62-97, 2001.

HOLFORD, I.C.R. Efficacy of different phosphate application methods in relation to phosphate sorptivity of soils. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v.27, n.1, p.123-133, 1989.

JOHNSTON, A.E.; POULTON, P.R.; FIXEN, P.E.; CURTIN, D. Phosphorus: its efficient use in agriculture. **Advances in Agronomy**, San Diego, v.123, p.177-228, 2014.

JOHNSTON, A.E.; RICHARDS, I.R. Effectiveness of the water-insoluble component of triple superphosphate for yield and phosphorus uptake by plants. **Journal of Agricultural Science**, Cambridge, v.140, p.267-274, 2003.

KHASAWNEH, F.E.; DOLL, E.C. The use of phosphate rock for direct application to soils. **Advances in Agronomy**, San Diego, v 30, p.159-206, 1978.

KORNDÖRFER, G.H.; MELO, S.P. Fontes de fósforo (fluida ou sólida) na produtividade agrícola e industrial da cana-de-açúcar. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.33, n.1, p.92-97, 2009.

LIU, J. et al. Growth and yield of sugarcane genotypes are strongly correlated across irrigated and rainfed environments. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.196, p.418-425, 2016.

MEHRA, O.P.; JACKSON, M.L. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. **Clays and Clay Minerals**, Chantilly, v.7, p.317-327, 1960.

MEYER, J.H. The role of phosphorus in the production of sugarcane in South Africa. **Phosphorus in Agriculture**, n.78, p.23-32, 1980.

MORELLI, J.L., NELLI, E.J., BAPTISTELLA, J.R., DEMATTÊ, J.L.I. Termofosfato na produtividade da cana-de-açúcar e nas propriedades químicas de um solo arenoso de baixa fertilidade. **R. Bras. Ci. Solo**, Campinas, v.15, n.1, p.57-61, 1991.

MULLINS, G.L.; SIKORA, F.J.; BARTOS, J.M.; BRYANT, H.H. Plant availability of phosphorus in the water-insoluble fraction of comercial triple superphosphate fertilizers. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v.54, p.1469-1472, 1990.

MURPHY, J.; RILEY, J.P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. **Analytica Chimica Acta**, Oxford, v.27, n.1, p.31-36, 1962.

NOVAIS, R.F., SMYTH, T.J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa: UFV, 1999. 399p.

OHNO, T.; HIRADATE, S.; HE, Z. Phosphorus solubility of agricultural soils: a surface charge and phosphorus-31 NMR speciation study. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v.75, n.5, p.1704-1711, 2011.

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 variedades de cana-de-açúcar cultivadas sob irrigação plena. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.34, n.4, p.1343-1352, 2010.

OMOLLO, J.O.; ABAYO, G.O. Effect of phosphorus sources and rates on sugarcane yield and quality in Kibos, nyando sugar zone. In: BATIONO, A.; WASWA, B.; OKEYO, J.M.; MAINA, F.; KIHARA, J.(Eds.). **Innovations as key to the green revolution in Africa: exploring the scientific facts**. Dordrecht: Springer, 2011. p.533-537.

OTANI, T.; AE, N. Phosphorus (P) uptake mechanisms of crops grown in soils with low P status. I. screening of crops for efficient P uptake. **Soil Science and Plant Nutrition**, London, v.42, n.1, p.155-163, 1996.

PARFITT, R.L. Phosphate reactions with natural allophane, ferrihydrite and goethite. **Journal of Soil Science**, Oxford, v.40, p.359-369, 1989.

PARFITT, R.L.; HUME, L.J.; SPARLING, G.P. Loss of availability of phosphate in New Zeland soils. **Journal of Soil Science**, Oxford, v.40, p.371-382, 1989.

PAVINATO, P.S.; MERLIN, A.; ROSOLEM, C.A. Phosphorus fraction in Brazilian Cerrado soils as affected by tillage. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.105, p.149-155, 2009.

PROCHNOW, L.I.; KIEHL, J.C.; RAIJ, B. van. Plant availability of phosphorus in the neutral ammonium citrate fraction of Brazilian acidulated phosphates. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v.52, p.61-65, 1998.

RAIJ, B. van; ANDRADE, J.C. de; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: IAC, 2001. 285p.

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. Campinas: IAC, 1997. 285p. (Boletim técnico nº 100)

RAIJ, B. van; QUAGGIO, J.A.; SILVA, N.M. Extraction of phosphorus, potassium, calcium and magnesium from soils by an ion-exchange resin procedure. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Philadelphia, v.17, n.5, p.547-566, 1986.

RAJAN, S.S.S.; WATKINSON, J.H.; SINCLAIR, A.G. Phosphate rocks for direct application to soils. **Advances in Agronomy**, San Diego, v.57, p.77-159, 1996.

RAMESH, P. Effect of different levels of drought during the formative phase on growth parameters and its relationship with dry matter accumulation in sugarcane. **Journal of Agronomy and Crop Science**, Berlin, v.185, n.4, p.83-90, 2000.

RAMESH, P.; MAHADEVASWAMY, M. Effect of formative phase drought on different classes of shoots, shoot mortality, cane attributes, yield and quality of four sugarcane cultivars. **Journal of Agronomy and Crop Science**, Berlin, v.185, n.4, p.249-258, 2000.

RANDHAWA, P.S.; CONDRON, L.M.; DI, HONG-J.; SINAJ, S.; MCLENAGHEN, R.D. Phosphorus availability in soils amended with different phosphate fertilizers. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Philadelphia, v.37, n.1-2, p.25-39, 2006.

REDE INTERUNIVERSITÁRIA PARA O DESENVOLVIMENTO DO SETOR SUCROALCOOLEIRO/RIDESA. **Catálogo nacional de variedades “RB” de cana-de-açúcar**, Curitiba, 2010. 136p. Disponível em: <https://ridesa.agro.ufg.br/n/38033-catalogo-nacional-de-variedade-rb-de-cana-de-acucar>. Acesso em: 11 mai. 2016.

REIN, T.A.; SOUSA, D.M.G. Sugarcane response to phosphorus sources and placement in a very clayey oxisol of the Brazilian Cerrado. **Proceedings International Society Sugar Cane Technologists**, Vera Cruz, v.28, p.1-9, 2013.

RICHARDS, J.E. Chemical characterization of plant tissue. In: CARTER, M.R. (Ed.). **Soil sampling and methods of analysis**. Canadian Society of Soil Science: 1993. p.115-139.

ROBINSON, J.S.; SYERS, J.K. A critical evaluation of the factors influencing the dissolution of gafsa phosphate rock. **Journal of Soil Science**, Oxford, v.41, p.597-605, 1990.

RODRIGUES, M.; PAVINATO, P.S.; WITHERS, P.J.A.; TELES, A.P.B.; HERRERA, W.F.B. Legacy phosphorus and no tillage agriculture in tropical oxisols of the Brazilian savana. **Science of The Total Environment**, Amsterdam, v.542, p.1050-1061, 2016.

ROSSETTO, R.; DIAS, F.L.F.; VITTI, A. Problemas nutricionais dos solos nas novas fronteiras canvieiras, **Idea News**, São Paulo, v.8, n.94, p.78-90, 2008.

SAGOE, C.I.; ANDO, T.; KOUNO, K.; NAGAOKA, T. Relative importance of protons and solution calcium concentration in phosphate rock dissolution by organic acids. **Soil Science and Plant Nutrition**, London, v.44, n.4, p.617-625, 1998.

SANCHEZ, P.A.; UEHARA, G. Management considerations for acid soils with high fixation capacity. In: KHASAWNEH, F.E.; SAMPLE, E.C.; KAMPRATH, E.J. (Eds.) **The role of phosphorus in agriculture**. Madison: ASA-CSSA-SSSA, 1980. chap. 17, p.471-514.

SANTOS, V.R.; MOURA FILHO, G.; ALBUQUERQUE, A.W.; COSTA, J.P.V.; GOMES, C.G.; SANTOS, A.C.I. Crescimento e produtividade de cana-de-açúcar em diferentes fontes de fósforo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.13, n.4, p.389-396, 2009.

SAS Institute Incorporation. **The SAS system for Windows, versão 9.3**, Cary, 2010.

SAVINI, I.; KIHARA, J.; KOALA, S.; MUKALAMA, J.; WASWA, B.; BATIONO, A. Long-term effects of TSP and Minjingu phosphate rock applications on yield response of maize and soybean in a humid tropical maize-legume cropping system. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v.104, n.1, p.79-91, 2016.

SCHMIDT, J.P.; BUOL, S.W.; KAMPRATH, E.J. Soil phosphorus dynamics during 17 years of continuous cultivation: A method to estimate long-term P availability. **Geoderma**, Amsterdam, v.78, p.59-70, 1997.

SHARPLEY, A.N. Phosphorus cycling in unfertilized and fertilized agricultural soils. **Science Society of American Journal**, Madison, v.49, n.4, p.905-911, 1985.

SHARPLEY, A. N.; TIESSEN, H.; COLE, C. V. Soil phosphorus forms extracted by soil tests as a function of pedogenesis. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.51, n.2, p.362-365, 1987.

SHIGAKI, F.; SHARPLEY, A. Phosphorus source and soil properties effects on phosphorus availability. **Soil Science**, Hague, v.176, n.9, p.502-507, 2011.

SINGH, J.; BRAR, B.S.;SEKHON, B.S.; MAVI, M.S.; SINGH, G.; KAUR, G. Impact of long-term phosphorous fertilization on Olsen-P and grain yields in maize–wheat cropping sequence. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v.106, n.2, p.157-168, 2016.

SOUSA, D.M.G.; VOLKWEISS, S.J. Reações do superfosfato triplo em grânulos com solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.11, p.133-140, 1987.

SOUSA, R.T.X.; KORNDÖRFER, G.H.; SOARES, R.A.B.; FONTOURA, P.R. Phosphate fertilizers for sugarcane used at pre-planting (phosphorus fertilizer application). **Journal of Plant Nutrition**, London, v.38, n.9, p.1444-1455, 2015.

SUI, Y.; THOMPSON, M.L. Phosphorus sorption, desorption, and buffering capacity in a biosolids-amended mollisol. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.64, p.164-169, 2000.

SUNDARA, B. Phosphorus efficiency of sugarcane varieties in a tropical alfisol. **Fertilizer Research**, Dordrecht, v.39, p.83-88, 1994.

TIESSEN, H. Phosphorus dynamics in tropical soils. In: SIMS, J.T.; SHARPLEY, A.N. (Eds). **Phosphorus: agriculture and the environment** Madison: ASA-CSSA-SSSA, 2005. chap. 8, p.253-262. (Number 46: series agronomy).

TIESSEN, H.; STEWART, J.W.B.; COLE, C.V. Pathways of phosphorus transformations in soils of differing pedogenesis. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v.48, p.853-858, 1984.

TSADO, P. A.; LAWAL, B. A.; IGWE, C. A.; ADEBOYE, M. K. A.; ODOFIN, A. J.; ADEKAMBI, A. A. Effects of sources and levels of phosphorus on yield and quality of sugarcane in Southern Guinea Savanna Zone of Nigeria. **Agriculture Science Developments**, Dadaab, v.2, n.3, p.25-27, 2013.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS - UFSCar. Programa de Melhoramento Genético da Cana-de-açúcar – PMGCA. **Censo varietal 2014**. Disponível em: <http://pmgca.dbv.cca.ufscar.br/variedades>. Acesso em: 11 mai. 2016.

USEPA - United States Environmental Protection Agency. **Methods of chemical analysis for water and wastes**. Cincinnati: USEPA, 1971.

WANG, Y.; TANG, J.; ZHANG, H.; SCHRODER, J.L.; HE, Y. Phosphorus availability and sorption as affected by long-term fertilization. **Agronomy Journal**, Madison, v.106, n.5, p.1583-1592, 2014.

ZAPATA, F.; ROY, R.N. **Use of phosphate rocks for sustainable agriculture. Fertilizer and Plant Nutrition.** Rome: FAO, bulletin 13.

ZIADI, N.; WHALEN, J.K.; MESSIGA, A.J.; MOREL, C. Assessment and Modeling of Soil Available Phosphorus in Sustainable Cropping Systems. In: SPARKS, D.L. (Ed.). **Advances in Agronomy**, Burlington: Academic Press, v.122, p.85-126, 2013.

3. FÓSFORO NO SOLO E PRODUTIVIDADE DA CANA-DE-AÇÚCAR SOB FONTES FOSFATADAS ASSOCIADAS À TORTA DE FILTRO

Resumo

O uso de fonte mineral de P acompanhada de fonte orgânica pode aumentar a produtividade da cana e diminuir os custos com fertilizantes. A aplicação de torta de filtro ao solo é uma forma de adicionar matéria orgânica e fornecer nutrientes para as plantas. Para avaliar os efeitos de fontes e doses de P associadas a torta de filtro no rendimento agrícola e industrial da cana-de-açúcar e nas formas de P do solo foram conduzidos experimentos de campo em área de expansão, em um solo muito baixo em P, de textura areia franca e baixa adsorção de P e em outro solo baixo em P, de textura muito argilosa, com alta capacidade de adsorção, cultivado por décadas com cana-de-açúcar. As fontes foram o super triplo e fosfato reativo nas doses de 90 e 180 kg ha⁻¹ de P₂O₅, associadas com e sem 10 t ha⁻¹ de torta de filtro. Foi feito o fracionamento do P do solo das camadas 0-20 e 20-40 cm após cada ano de cultivo. A adição de fertilizante associado com a torta aumentou o rendimento de açúcar total recuperável (ATR), tonelada de pol por hectare (TPH) e de colmos industrializáveis e aumentou a extração de P pela parte aérea na cana planta da área de expansão, mostrando que o efeito da torta foi mais expressivo no primeiro ano. Na área estabelecida a torta de filtro só influenciou a extração de nutrientes da parte aérea. A eficiência de recuperação do P foi baixa alcançando 20% nos dois anos na área de expansão e foi negativa na área estabelecida. O P-resina, Pi-bic e Pi-hid0.1 tenderam a serem alterados pelo ST na presença de torta e geralmente acompanhou o aumento da dose enquanto o P-HCl e o Pi-hid0.5 são alterados pelo FNR. A torta não alterou as frações de P de 0-20 cm mas aumentou o Pi-bic e diminuiu a fração não lábil Po-hid0.5 de 20-40 cm na área estabelecida. As quantidades de P nativo do solo da área estabelecida foram suficientes para altas produtividades. A fonte reativa apresentou bom potencial em suprir P para a cana-de-açúcar. A torta de filtro não apresentou efeito residual na cana soca. A torta de filtro aumentou a eficiência agrônômica e a recuperação do P aplicado para a fonte reativa no ciclo de cana planta na área de expansão. Os níveis de P do solo da área estabelecida foram suficientes para altas produtividades. As frações P-resina, Pi-bic e Pi-hid0.1 tendem a serem mais alteradas pelo ST na presença de torta e geralmente acompanha o aumento da dose. O P-HCl é alterado pelo FNR e aumenta com a dose na presença da torta com pouca influência na área estabelecida. A associação da torta de filtro com a fonte reativa pode ser uma boa opção de manejo para a cana-de-açúcar em função da maior liberação de P pela torta no primeiro ano de aplicação e pelo importante efeito residual do fosfato reativo ao longo dos ciclos da cultura.

Palavras-chave: Fosfato Reativo; Solubilidade; Fracionamento; Resíduo orgânico

Abstract

The use of mineral P source accompanied by organic source can help in the efficiency of fertilization and decrease the costs with fertilizers. Applying filter cake to the soil is a way to add organic matter and provide nutrients to the plants. In order to evaluate the effects of sources and rates of P associated with filter cake on the agricultural and industrial yield of sugarcane and on the soil P forms, field experiments were carried out in an expansion area in a very low soil P, sand texture and low adsorption of P and in a very clay texture soil with high capacity of adsorption, low P level, cultivated for decades with sugar cane. The sources were triple superphosphate (TSP) and reactive phosphate (RP) at the rate of 90 and 180 kg ha⁻¹ of P₂O₅, associated with and without 10 t ha⁻¹ of filter cake. The soil P fractionation of the layers 0-20 and 20-40 cm was determined after each cultivated year. The addition of fertilizer associated with filtercake increased the yield of total recoverable sugar (TRS), tonne of sugar per hectare (TSH) and yield cane and increased the P extraction by the aerial part in the cane plant of the expansion area, showing that the effect of the filter cake was more expressive in the first year. In the established area the filter cake only influenced the extraction of nutrients from the aerial part. The recovery efficiency of P was low reaching 20% in the two years in the expansion area and was negative in the established area. The P-resin, Pi-bic and Pi-hid0.1 were altered by TSP in the presence of filter cake and usually accompanied the increase in rate while P-HCl

and Pi-hid0.5 were altered by RP. Filter cake did not change the fractions of P from 0-20 cm but increased the Pi-bic and decreased the non-labile fraction Po-hid0.5 from 20-40 cm in the established area. The amounts of native P of the soil of the established area were sufficient for high yields. The reactive source presented good potential to supply P for sugarcane. The filter cake had no residual effect on 1st ratoon. The filter cake increased the agronomic efficiency and the recovery of the P applied to the reactive source in the cane plant cycle in the expansion area. The soil P levels of the established area were sufficient for high yields. The P-resin, Pi-bic and Pi-hid0.1 fractions were altered by TSP in the presence of filter cake and usually accompany rate increase. P-HCl was altered by RP and increased with the rate in the presence of the filter cake with little influence on the established area. The association of the filter cake with the reactive source can be a good management option for sugarcane due to the greater release of P by the filter cake in the first year of application and by the important residual effect of the reactive phosphate over the cycles of culture.

Keywords: Reactive Phosphate; Solubility; Fractionation; Organic waste

3.1. Introdução

Cerca de um terço das áreas cultivadas do globo apresentam déficits de fósforo (P) para atender as exigências das culturas. A limitada disponibilidade de P nos solos deve-se à pobreza natural do material de origem, intensidade e duração do processo de intemperismo, baixo teor de matéria orgânica do solo, balanço negativo entre entrada e saída de P, às perdas por erosão e escoamento superficial ou à forte retenção de P que atinge grande parte dos solos do mundo (BATJES, 2011; MACDONALD et al., 2011).

A retenção e as transformações do P dependem da mineralogia e das propriedades físico-químicas do solo. Nos solos dos trópicos úmidos mais intemperizados, o aproveitamento do P adicionado ao solo no primeiro ciclo de cultivo em média não passa de 30% e a produtividade das culturas é mantida com adição de fertilizantes (SAVINI et al., 2016). As concentrações do P-solução representam uma pequena fração do P-total em função do P adicionado ao solo ser removido da solução por meio dos processos de precipitação/adsorção, transformando-se em formas inorgânicas ligadas a fração mineral com alta energia e formas orgânicas estabilizadas química e fisicamente (RHEINHEIMER; ANGHINONI, 2001).

O manejo tradicional do fornecimento de P para a cana-de-açúcar no Brasil é feito com o uso de fontes fosfatadas prontamente solúvel em água, distribuído na implantação da cultura para atender a cana planta e as soqueiras subsequentes (LIMA FILHO; ZAMBELLO JÚNIOR; ORLANDO FILHO, 1982). No entanto, fontes de alta solubilidade podem ser convertidas em formas insolúveis de Fe-P e Al-P, na superfície dos minerais em solos ácidos e/ou formarem precipitados com os óxidos de Fe, Al e Ca na solução saturada de P na região de distribuição dos grânulos, resultando em decréscimo da disponibilidade do nutriente

para as plantas com o tempo de aplicação (CHIEN et al., 2011; ALMEIDA; ROSOLÉM, 2016).

Aliado a diminuição da disponibilidade de P das fontes solúveis com o tempo, houve a elevação dos preços desses fertilizantes no mercado, devido ao aumento na procura e por se tratar de um recurso finito e não renovável, do qual depende a garantia da segurança alimentar do planeta. Ao mesmo tempo, surge no mercado fontes alternativas de rocha sedimentar denominadas de reativas como o fosfato de Gafsa e Bayóvar. Estes são de natureza microcristalina e consistem de agregados de microcristais suficientemente abertos e frouxamente consolidados com relativamente grande superfície de área específica, que geralmente está associada a substituição isomórfica de CO_3^{2-} por PO_4^{3-} e por minerais acessórios na estrutura do mineral (SANYAL; DE DATTA, 1991).

Pesquisas desenvolvidas com essas fontes têm demonstrado eficiência agrônômica similar ao superfosfato triplo na cana-de-açúcar e em outras culturas no Brasil e no mundo (GIKONYO et al., 2010; OMOLLO; ABAYO, 2011; REIN; SOUSA, 2013; CAIONE et al., 2015; SAVINI et al., 2016). Essas fontes devem se comportar de maneira diferentes em novas áreas de expansão, com solos ácidos e baixo pH e em áreas tradicionalmente cultivadas com cana, com fertilidade melhorada pelas fertilizações nos cultivos.

O uso de fertilizantes orgânicos também tem aumentado como forma de reciclagem e melhor aproveitamento do P. Essas fontes sozinhas ou em associação com fertilizantes minerais têm aumentado o P total e inorgânico do solo, bem como maior disponibilidade do P para as plantas (GIKONYO et al., 2010; WANG et al., 2014). A matéria orgânica do solo pode reduzir significativamente a quantidade de fosfato requerido para manter uma concentração adequada de P na solução do solo para o crescimento das plantas. A habilidade de redução da adsorção de fosfato pelas substâncias húmicas ocorre em menores valores de pH, onde o poder tampão destas é alto em relação ao do fosfato (SIBANDA; YOUNG, 1986). Wang et al. (2014), observaram que adição de fontes orgânicas contribuiu para aumentar o P total e inorgânico do solo e melhorou a disponibilidade para as plantas. Eles verificaram que a adição de fontes orgânicas com alta relação C/N e baixas concentrações de P pode favorecer a imobilização de P pelos microrganismos do solo.

Damon et al. (2014) em revisão sobre a contribuição de resíduos para o P de solos agrícolas indicaram que a efetividade de alterações favoráveis ao aumento do P do solo está relacionada a fontes com concentrações acima de 3 g kg^{-1} de P quando estas são aplicadas em doses superiores a 5 t ha^{-1} . Nessa direção, a torta de filtro representa uma boa fonte de P, pois apresenta altas concentrações e é aplicada em altas doses. Esse resíduo, oriundo do processo

de clarificação do caldo da cana-de-açúcar considerado antes, um problema em termos de área para estocagem e ambiental pelo forte odor liberado, pode fornecer boa quantidade de matéria orgânica para o solo e ser uma fonte alternativa de nutrientes para as plantas (DOTANIYA et al., 2016). Dentre os nutrientes principais, podemos notar uma predominância de nitrogênio (N), fósforo (P), cálcio (Ca) e menores teores de potássio (K), enxofre (S), magnésio (Mg) e micronutrientes (CORTEZ et al., 1992; DEE; HAYNES; GRAHAM, 2003).

Gilbert et al. (2008), observaram aumento no rendimento agrícola e industrial em solos arenosos cultivados com cana-de-açúcar na Flórida quando se aplicou torta de filtro e que não foi necessária a aplicação de fertilizantes no ciclo de cana planta. Em doses elevadas houve um forte efeito residual na 1ª e 2ª soca, indicando a possibilidade de diminuição do uso de fertilizantes inorgânicos com o uso desse resíduo. Observou-se também a interação positiva entre o resíduo e os fertilizantes minerais. Outros trabalhos têm demonstrado que a torta de filtro pode suprir todo o P da cana-de-açúcar no ciclo de cana-planta com a dose de 10 a 20 t ha⁻¹ (PRASAD, 1976; RODELLA; SILVA; ORLANDO FILHO, 1990).

Caione et al. (2015) observaram interação positiva das fontes super triplo, bayóvar e fosfato de Araxá e que houve incremento do P do solo com a adição de torta de filtro no ciclo de cana planta. Os principais efeitos da aplicação de torta de filtro nas propriedades físico-químicas do solo são aumento da matéria orgânica, N, P, Ca, CTC e diminuição de Alumínio trocável (Al³⁺). É importante na manutenção da umidade do solo e pode funcionar como corretivo em altas doses aplicadas em área total (PRADO et al., 2013; DOTANIYA et al., 2016).

Apesar de vários trabalhos e revisões terem sido feitos com esse resíduo, trabalhos que comparem a ação desta fonte em associação ou não com fertilizantes minerais na dinâmica do P em áreas de expansão e áreas já estabelecidas com cana-de-açúcar ainda não foram feitos. Neste sentido, um melhor entendimento da dinâmica do P do solo em áreas tradicionalmente estabelecidas com cana-de-açúcar e em áreas de expansão é de fundamental importância para um melhor manejo da adubação fosfatada.

3.2 Material e Métodos

A caracterização da área experimental e a implantação e condução dos experimentos estão descritos nos itens 2.2.1 e 2.2.2.

3.2.1 Tratamentos

Os tratamentos foram compostos de fontes e doses de fosfatos associados com a aplicação de uma dose padrão de 10 t ha⁻¹ de torta de filtro (base seca), utilizada pelos produtores de cana da região dos experimentos. As fontes utilizadas foram superfosfato triplo e fosfato reativo (Gafsa/Agudos e Bayóvar/Macatuba). As duas fontes fosfatadas foram aplicadas nas doses de 90 e 180 kg ha⁻¹ de P₂O₅ solúvel (CNA+H₂O para a fonte solúvel e AC a 2% para os fosfatos reativos). A dose de 180 kg ha⁻¹ de P₂O₅ representa a dose recomendada para a cana-de-açúcar e a dose de 90 kg ha⁻¹ P₂O₅, metade da dose recomendada, seria utilizada quando se aplica torta de filtro (15 a 30 t ha⁻¹ base úmida) no sulco de plantio, pelo boletim oficial do estado de São Paulo - boletim 100 (RAIJ et al., 1997).

A distribuição da torta de filtro no fundo do sulco foi feita mecanicamente, com prévia regulagem do dosador para a quantidade desejada em Agudos e de forma manual com a utilização de baldes plásticos (Figura 19) em Macatuba.



Figura 19. Área experimental com vista dos baldes utilizados na distribuição da torta de filtro, fazenda Pouso Alegre, Macatuba-SP

A opção pela distribuição da torta de forma manual foi devido às dificuldades encontradas anteriormente no experimento de Agudos, sendo uma forma de melhorar a uniformidade de distribuição do material. Os baldes utilizados foram calibrados por meio de 10 pesagens.

A descrição dos tratamentos encontra-se na tabela 12. As percentagens de P₂O₅ total, solúvel em citrato neutro de amônio + água (CNA+ H₂O) e em ácido cítrico (AC) de cada fonte utilizada encontram-se na tabela 13.

Tabela 12. Descrição dos tratamentos aplicados na ocasião da implantação dos experimentos no campo.

Tratamento	Torta	Fonte	Dose de P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹)
1	COM	Fosfato Solúvel	90
2	COM	(Super Triplo)	180
3	COM	Fosfato Reativo	90
4	COM	(Gafsa ou Bayóvar)	180
5	COM	Controle	Sem P
6	SEM	Fosfato Solúvel	90
7	SEM	(Super Triplo)	180
8	SEM	Fosfato Reativo	90
9	SEM	(Gafsa ou Bayóvar)	180
10	SEM	Controle	Sem P

Tabela 13. Concentração de fósforo total e solúvel nas fontes utilizadas no experimento.

Fonte	Total	Fósforo (P ₂ O ₅)	
		CNA+H ₂ O	AC 2% (1:100)
		%	
Super triplo	47,5	46,9	-
Gafsa	28,5	4,2	9,6
Bayóvar	28,9	6,5	14,8

Todos os fertilizantes e a torta de filtro foram distribuídos no fundo do sulco de plantio e após foi feita a distribuição dos toletes de cana (Figura 20).



Figura 20. Vista geral da torta e dos toletes da variedade de cana CTC 16, distribuídos no sulco de plantio, fazenda Pouso Alegre, Macatuba-SP

Os resultados das análises químicas das tortas de filtro utilizadas nas duas áreas experimentais, Agudos e Macatuba, encontram-se na tabela 14.

Tabela 14. Resultado das análises da torta de filtro utilizadas nos experimentos em Agudos e Macatuba-SP.

Atributo	Base seca 65° C	
	Agudos	Macatuba
pH (CaCl ₂ 0,01 M)	6,7	7,4
Matéria orgânica total (combustão) (%)	28,61	53,29
Carbono orgânico (%)	14,32	27,59
Nitrogênio total (%)	2,31	3,54
Fósforo (P ₂ O ₅) total (%)	1,25	2,59
Potássio (K ₂ O) total (%)	0,14	1,07
Cálcio (Ca) total (%)	1,95	4,09
Magnésio (Mg) total (%)	0,16	0,33
Enxofre (S) total (%)	0,19	0,28
Relação C/N	7	8

3.2.2 Delineamento experimental

O delineamento adotado foi em blocos ao acaso no esquema de parcelas subdivididas com dez tratamentos e três repetições. As parcelas principais foram constituídas da ausência e presença de torta de filtro. Nas subparcelas foram distribuídas as fontes fosfatadas: superfosfato triplo e fosfato reativo e nas subsubparcelas as doses de 90 e 180 kg ha⁻¹ P₂O₅ solúvel. Foram incluídos dois tratamentos adicionais, um como controle absoluto e outro controle com torta de filtro. Cada unidade experimental (subsubparcela) foi constituída de 6 linhas com espaçamento de 1,5 m e 10 m de comprimento, perfazendo 90 m² de área total. As subparcelas (fontes) foram constituídas de 2 x 90 m², totalizando 180 m² e as parcelas (torta) 5 x 90 m², equivalente a 450 m².

3.2.4 Avaliações realizadas

As avaliações realizadas foram as mesmas descritas no item 2.2.5.

3.2.5 Procedimentos estatísticos

Os procedimentos estatísticos realizados foram os mesmos descritos no item 2.2.6. Quando alguma das pressuposições não foram atendidas buscou-se a transformação dos dados utilizando-se o procedimento potência ótimo (Anexo 3A) de Box e Cox (1964). As tabelas do anexo 3 B e 3 C não foram discutidas neste trabalho e servem somente para consultas.

3.3 Resultados e discussão

3.3.1 Rendimento e extração de P

Os resultados da análise de variância para o ciclo de cana planta em Agudos são apresentados na tabela 15. Na comparação, por meio de contrastes, com o controle sem torta e sem P, verifica-se que, a exceção do FNR que incrementou apenas a produtividade e o P extraído pelo colmo, a torta de filtro, as fontes e as doses aumentaram o rendimento em ATR e TPH (industrial), a produtividade e a extração de P pela folha, colmo e o P total extraído pela cana no primeiro ano de cultivo.

O controle com torta produziu 131,8 t ha⁻¹ de colmo, 18,5 t ha⁻¹ de ATR e 21,5 t ha⁻¹ de TPH. Isso equivale a uma diferença de 21,6, 2,9 e 3,1 t ha⁻¹ de colmo, ATR e TPH, respectivamente, em relação ao controle sem torta. Na comparação entre tratamentos com e sem torta as diferenças foram de 14,4, 2,1 e 2,4 t ha⁻¹ de colmo, ATR e TPH, respectivamente. São valores considerados bastante expressivos, pois há um potencial enorme de aumento da área de cana cultivada com torta de filtro.

Tabela 15. Rendimento agrícola e industrial, massa seca e extração de P pela cana-de-açúcar sob fontes e doses de fosfatos associadas com torta de filtro, Agudos-SP, 2014.

Tratamento	NPm	ATR	TPH	Prod	Fol	Col	Pon	Tot	PFol	PCol	Ppon	PTot
t ha ⁻¹								kg ha ⁻¹				
Controle Com	8,3	18,5	21,5	131,8	7,9	27,5	4,4	39,8	1,4	6,9	4,8	13,1
Controle Sem	7,2	15,6	18,4	110,2	7,2	28,9	3,7	39,8	1,3	5,7	3,9	10,9
Torta Com	8,0	18,8	22,1	134,2	8,6	31,9	4,4	44,9	1,9	9,5	5,0	16,3
(T) Sem	7,3	16,7	19,7	119,8	7,2	27,3	4,2	38,7	1,6	6,3	4,3	12,2
Fonte ST	7,7	18,1	21,2	129,6	8,1	29,9	4,3	42,3	1,9	8,0	4,6	14,6
(F) FNR	7,6	17,5	20,5	124,4	7,7	29,3	4,3	41,2	1,6	7,7	4,7	14,0
Dose 90	7,7	17,5	20,6	125,8	7,9	29,3	4,2	41,4	1,8	8,4	4,5	14,6
(D) 180	7,5	18,0	21,1	128,2	7,9	29,9	4,3	42,2	1,7	7,4	4,8	13,9
Efeito	Teste F											
T	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	**
F	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
D	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
TxF	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns
TxD	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
FxD	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	**	ns	*	ns
TxFxD	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	*
CV%	11	6	6	8	14	16	13	15	13	16	13	13
Contraste												
C vs C Torta	ns	*	*	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C vs Trat	ns	*	*	**	ns	ns	ns	ns	*	**	ns	**
C vs Trat Com	ns	**	**	***	ns	ns	ns	ns	**	<***	*	<***
C vs Trat Sem	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C vs ST	ns	*	*	**	ns	ns	ns	ns	**	**	ns	**
C vs FNR	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	**	ns	**
C vs dose 90	ns	*	*	*	ns	ns	ns	ns	*	***	ns	**
C vs dose 180	ns	*	*	**	ns	ns	ns	ns	ns	*	*	**

NPm = número por metro de planta, ATR = açúcar total recuperável, TPH = tonelada de pol por hectare, Prod = produtividade, Fol, Col, Pon e Tot = massa seca da folha, colmo, ponteiro e total, respectivamente. PFol, PCol, PPon e PTot = fósforo na folha, colmo, ponteiro e total, respectivamente. ST = superfosfato triplo, FNR = fosfato natural reativo. CV = coeficiente de variação. Trat = tratamento. <***, ***, **, * e ns, significativo a menos de 0,1%, 0,1, 1 e 5% e não significativo, respectivamente.

Resultados de pesquisas têm demonstrados que a aplicação de 10 a 30 t ha⁻¹ de torta de filtro em associação ou não com fertilizantes inorgânicos aumentou o rendimento de açúcar e a produtividade de colmos industrializáveis (PRASAD, 1976; YADUVANSHI; YADAV; SINGH, 1990; PAUL; MANNAN, 2007).

Bokhtiar e Sakurai (2005) observaram que a associação de 15 t ha⁻¹ de torta de filtro com fertilizantes inorgânicos elevou a produtividade de colmo e a quantidade de açúcar produzidos pela cana-de-açúcar cultivada em Bangladesh no ciclo de cana planta. Os aumentos devem estar relacionados ao fato dos fertilizante inorgânicos associados com uma fonte orgânica serem melhor aproveitados do que quando aplicados sozinhos em função dos benefícios da adição do carbono orgânico ao solo e do fornecimento de nutrientes para serem absorvidos pelas plantas (PAUL; MANNAN, 2007; ELSAYED et al., 2008; WANG et al., 2014), principalmente com fontes de P de menor solubilidade, a exemplo dos fosfatos reativos.

Os fosfatos reativos apresentam uma menor liberação de P do que fontes aciduladas no ano de sua aplicação, mas apresentam maior efeito residual nos anos subsequentes (SOUSA et al., 2015; GHOSAL et al., 2003). Adição de torta de filtro associada a essas fontes devem ser uma boa opção de manejo em áreas de expansão de cana-de-açúcar com solos pobres em P em função da maior liberação de P da torta ocorrer no primeiro ano de sua aplicação (PRASAD, 1976; BOKHTIAR; SAKURAI, 2005; CAIONE et al., 2015) e compensar a baixa dissolução dessa fonte, que depende da capacidade de suprimento de prótons do solo e particularmente de um dreno para o cálcio liberado da dissolução do fosfato (ROBINSON; SYERS, 1990; CHIEN; MENON, 1995).

Analisando os dados acima juntamente com os dados de precipitação (Figura 2) é razoável admitir que a torta de filtro, no ciclo de cana planta, além do fornecimento de nutrientes (principalmente P), deve ter contribuído para aumentar a umidade do solo, pois houve déficit hídrico nas fases de estabelecimento e desenvolvimento da cana (RAMESH; MAHADEVASWAMY, 2000). Isso tudo, aliado ao fato que a variedade RB86-7515 é adaptada a condição de estresse hídrico e que o P contribuiu para amenizar o estresse nessa variedade (SATO et al., 2010). Singh et al. (2007) observaram que a aplicação de 10 t ha⁻¹ de torta de filtro na cana planta e na 1ª soca promoveu diminuição da densidade do solo, melhorias na agregação, infiltração de água e atividade microbiana do solo e obteve extração de N, P, K e produtividade equivalentes a aplicação da dose recomendada de 150, 60 e 60 kg ha⁻¹ de N, P e K como fertilizantes inorgânicos.

O solo desse estudo apresentava baixa fertilidade e baixa capacidade de armazenamento de água e foi beneficiado com a aplicação de altas doses de matéria orgânica. Rodella, Silva e Orlando Filho (1990), avaliando a influência do modo de aplicação de torta de filtro no rendimento da cana-de-açúcar, observaram que a aplicação de 100 t ha⁻¹ em área total resultou em 126 t ha⁻¹, enquanto o controle produziu 92 t ha⁻¹ de colmo, um incremento de 34 t ha⁻¹ no ciclo de cana planta. A resposta foi atribuída às pobres condições de fertilidade e de retenção de umidade do solo e que a torta, além de fornecer nutrientes, aumentou o conteúdo de água na camada arável. Isso foi essencial para o crescimento da cana devido a baixa precipitação que prevaleceu durante o período, situação similar a obtida no presente estudo.

Apesar da análise de variância mostrar efeito da interação torta x fonte para o P extraído pela folha e fonte x dose para a massa seca do ponteiro e P do ponteiro (Tabela 15), o teste de Tukey (p<0,05) não indentificou diferenças entre os tratamentos para essas variáveis (Figuras 21A, 21C e 21D). Interação significativa pelo teste de Tukey foi observada para o P

extraído pela folha (Figura 21 B). A quantidade de P extraída pela folha não variou para a fonte ST com aplicação da metade ou da dose total de P recomendada mas na maior dose as quantidades foram maiores que as extraídas pelo FNR. O fosfato reativo teve as quantidades de P extraídas pela folha diminuída quando houve o aumento da dose de 90 para 180 kg ha⁻¹ de P₂O₅.

O desdobramento da interação tripla para a extração de P pelo colmo mostrou que as doses de P não interagiram com a fonte na presença da torta de filtro (Figura 22 A). Na ausência da torta de filtro, as doses não diferiram entre si em cada fonte e nem entre as fontes (Figura 22 B).

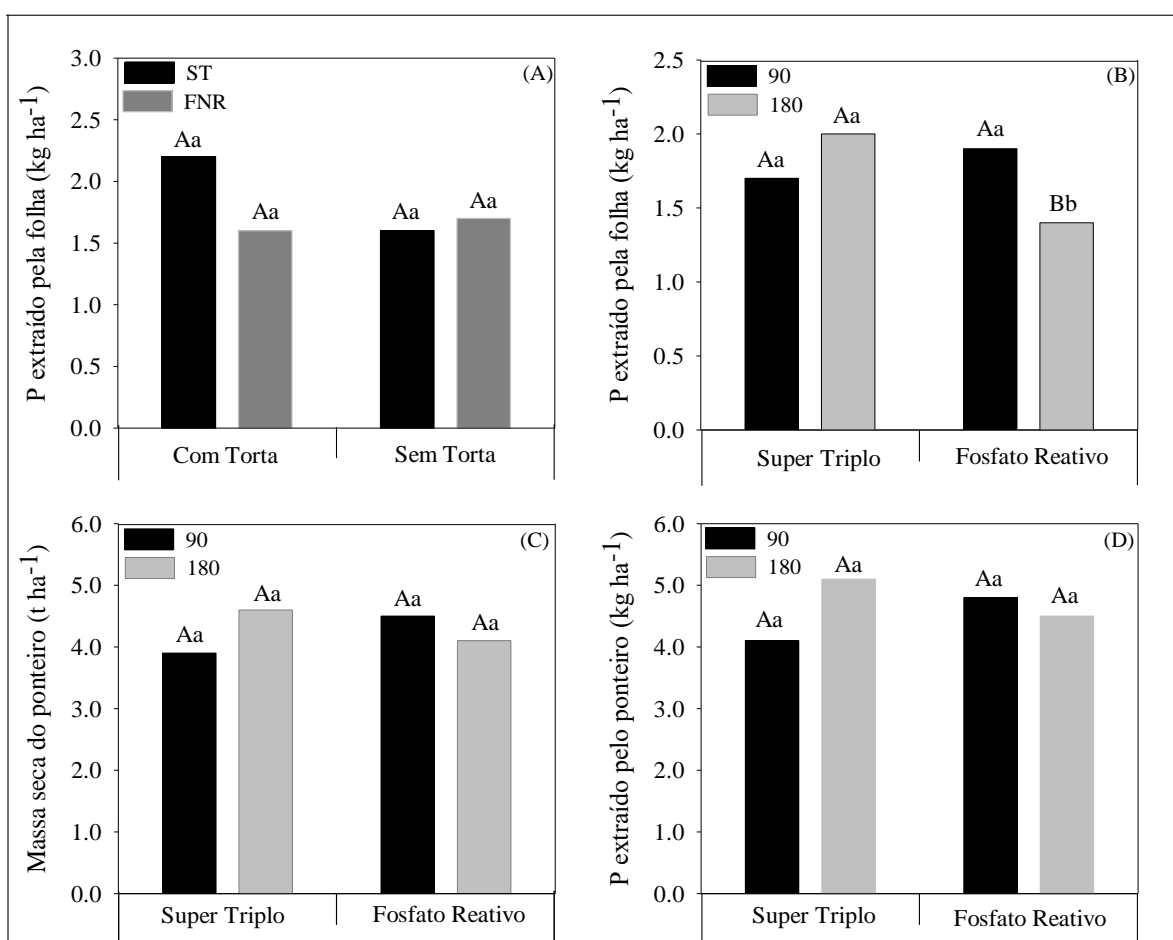


Figura 21. Desdobramento da interação do P extraído pela folha e pelo ponteiro e massa seca do ponteiro da cana-de-açúcar em fontes e doses de fósforo com e sem aplicação de 10 t ha⁻¹ de torta de filtro, Agudos 2014. Torta x fonte de P (A) e fonte x dose de P (B, C e D). Letras minúsculas comparam cada fonte na presença ou na ausência de torta ou cada dose na fonte super triplo ou no fosfato reativo e maiúsculas comparam cada fonte na ausência e na presença de torta ou cada dose na fonte super triplo e no fosfato reativo pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Na comparação da mesma dose de cada fonte na presença e ausência de torta de filtro, o P extraído pelo colmo foi maior para a dose de 90 kg ha⁻¹ de P₂O₅ do super triplo quando associado com torta de filtro. O FNR teve comportamento inverso ao ST para a dose. Ao

contrário do super triplo, o FNR possibilitou maior extração de P pelo colmo quando a dose de 180 kg ha⁻¹ de P₂O₅ foi associada com 10 t ha⁻¹ de torta de filtro (Figura 22 B).

A interação tripla para o P total extraído pela parte aérea da cana só foi verificada para a dose de 90 kg ha⁻¹ de P₂O₅ fornecida na forma de super triplo associada com 10 t ha⁻¹ de torta de filtro, com extração de 18,1 kg ha⁻¹ de P comparado aos 11,2 kg ha⁻¹ de P obtidos na ausência de torta de filtro (Figuras 22 C e 22 D). Isso indica que a torta de filtro foi importante para o aumento da extração de P e para o incremento na produtividade no ciclo de cana planta em Agudos, o que corrobora com resultados de outros autores (PRASAD, 1976; RODELLA; SILVA; ORLANDO FILHO, 1990; PAUL; MANNAN, 2007; CAIONE et al., 2015).

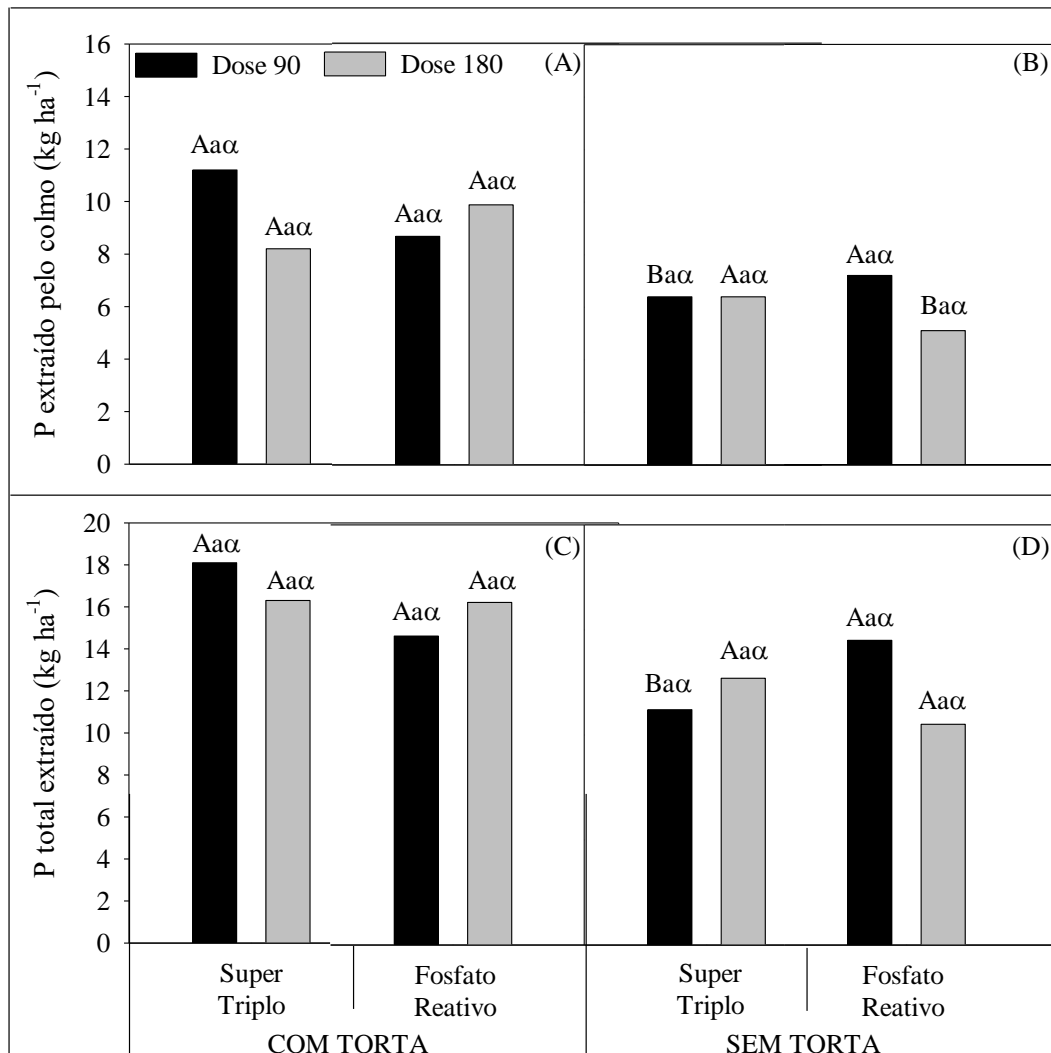


Figura 22. Desdobramento da interação tripla do P extraído pelo colmo e P total extraído pela cana-de-açúcar em fontes e doses de fósforo com e sem aplicação de 10 t ha⁻¹ de torta de filtro, Agudos 2014. P extraído pelo colmo (A e B) e P total extraído (C e D). Letras gregas compamra as doses em cada fonte na ausência ou na presença de torta, minúscula compara cada dose entre fontes na presença ou na ausência de torta e maiúsculas comparam cada dose da mesma fonte na ausência e na presença de torta, pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Os resultados da análise de variância para a cana planta do experimento de Macatuba indicam que não houve efeito dos fatores torta de filtro, fontes e doses e nem interação entre estes para o número de plantas por metro, rendimento de ATR e TPH (industrial), produtividade de colmo, massa seca da parte aérea, P extraído pela folha e pelo ponteiro (Tabela 16).

Tabela 16. Médias de rendimento agrícola e industrial, massa seca e extração de P pela cana-de-açúcar sob fontes e doses de fósforo associado com torta de filtro, Macatuba-SP 2015.

Tratamento		-----t ha ⁻¹ -----							-----kg ha ⁻¹ -----				
		NPm	ATR	TPH	Prod	Fol	Col	Pon	Tot	PFol	PCol	PPon	PTot
Controle	Com	12,7	25,0	30,1	174,4	17,5	38,1	6,8	62,3	3,5	16,9	6,5	26,8
Controle	Sem	11,1	22,2	26,7	157,3	16,4	34,6	5,2	56,2	3,0	14,2	4,4	21,5
Torta (T)	Com	12,5	24,1	28,8	168,0	16,2	37,2	6,2	59,7	2,7	18,1a	6,2	26,9a
	Sem	11,1	23,3	28,0	160,4	14,6	36,2	5,4	56,2	2,8	12,3b	4,8	19,9b
Fonte (F)	ST	12,1	23,6	28,3	163,0	16,4	36,8	6,0	59,1	3,1	14,1b	5,2	22,4
	FNR	11,5	23,8	28,5	165,3	14,4	36,8	5,6	56,7	2,4	16,2a	5,8	24,4
Dose (D)	90	12,3	23,9	28,6	165,8	16,1	37,3	5,5	58,9	2,8	15,3	5,6	23,7
	180	11,3	23,6	28,2	162,5	14,7	36,2	6,0	56,9	2,7	15,0	5,4	23,2
Efeito		Teste F											
T		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	*
F		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns
D		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
TxF		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
TxD		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
FxD		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
TxFxD		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
CV%		16	7	7	6	18	15	19	13	18	14	19	13
Contrastes													
C vs C Torta		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	*
C vs Trat		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C vs Trat Com		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**	*	**
C vs Trat Sem		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C vs ST		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C vs FNR		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C vs dose 90		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C vs dose 180		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

NPm = número por metro de planta, ATR = açúcar total recuperável, TPH = tonelada de pol por hectare, Prod = produtividade, Fol, Col, Pon e Tot = massa seca da folha, colmo, ponteiro e total, respectivamente. PFol, PCol, PPon e PTot = fósforo na folha, colmo, ponteiro e total, respectivamente. ST = superfosfato triplo, FNR = fosfato natural reativo. CV = coeficiente de variação. Trat = tratamento. **, * e ns, significativo a 1 e 5% e não significativo, respectivamente. Letra diferente indica que os tratamentos diferem pelo teste t (LSD) ($p \leq 0,05$).

A aplicação de 10 t ha⁻¹ de torta de filtro aumentou a extração de P pelo colmo e o P total extraído pela cana. Há de considerar o fato da área de Agudos ser uma área de transição de pastagem para cana e em função dos seus teores muito baixos de P respondeu a aplicação de torta (SAVINI et al., 2016). O solo da área já estabelecida com cana-de-açúcar em Macatuba tem melhor fertilidade do que a área de expansão e vem recebendo sequência de aplicações de fertilizantes fosfatados, que contribuíram para a elevação dos níveis de P desse solo, não respondendo a adubação fosfatada no ciclo de cana planta. Singh et al. (2016)

verificaram que em solo com altos teores de P, oriundos da aplicação de taxas anuais de fertilizantes, a produtividade só começou a declinar a partir da sexta colheita e que o P do solo diminuiu lentamente com os anos de cultivo, o que é provável ter ocorrido na área de Macatuba.

O colmo extraiu 18,1 kg ha⁻¹ de P na presença de torta e 12,3 kg ha⁻¹ na ausência desse composto orgânico. A extração de P total pela parte aérea da cana foi de 26,9 e 19,9 kg ha⁻¹ para a presença e ausência de torta, respectivamente (Tabela 16). As fontes influenciaram apenas o P extraído pelo colmo. O FNR promoveu a maior extração de P pelo colmo, atingindo 16,2 kg ha⁻¹ de P, enquanto para o ST o colmo extraiu 14,1 kg ha⁻¹ de P.

A comparação dos tratamentos com o controle sem torta, por meio de contrastes, confirma o baixo efeito dos tratamentos avaliados no rendimento agrícola e industrial, produção de massa seca e extração de nutrientes pela variedade de cana CTC-16 cultivada no experimento de Macatuba (Tabela 16). O controle com torta foi efetivo em elevar a extração de P pelo ponteiro e o P total, por outro lado, os tratamentos que receberam torta elevaram os teores de P extraídos pelo colmo, ponteiro e P total extraído pela parte aérea da cana em relação ao controle sem torta. Em suma, a adição de torta e/ou P só influenciou a extração de P pela parte aérea da cana, exceto a folha.

A falta de resposta da aplicação de torta, das fontes e, principalmente, das doses de P aplicadas deve ser reflexo da adição de fertilizantes fosfatados em cada época de renovação do canavial em anos anteriores. A adição continuada de fertilizantes fosfatados aumenta a eficiência de adubações subsequentes (BARROW; BOLLAND; ALLEN, 1998; BARROW, 2015; SAVINI et al., 2016). Solos com alta capacidade de sorção podem apresentar sítios de adsorção com diferentes energias de ligação. Neste caso, a adição de P é sorvida nos sítios de alta energia de ligação e não fica disponível para ser absorvido pelas plantas. A medida que se adiciona mais P há uma tendência de que o P recentemente aplicado seja sorvido nos sítios de menor energia e permaneça em formas mais disponíveis para as plantas (PARFITT, 1989; HE et al., 1994).

Os resultados da análise de variância no ciclo de primeira soca, colhida em agosto de 2015 em Agudos, mostram que os fatores torta de filtro, fontes e doses de P não exerceram influência isoladamente para nenhuma das variáveis avaliadas (Tabela 17). Houve apenas interação entre torta x fonte e entre fonte x dose para a extração de P pelo colmo. O comportamento das fontes ST e FNR na presença de torta de filtro foram semelhantes; mas na ausência de torta, o colmo extraiu 12,8 kg ha⁻¹ de P na fonte ST comparados com 9,3 kg ha⁻¹ de P extraídos pelo FNR (Figura 23 A).

Tabela 17. Médias de rendimento agrícola e industrial, massa seca e extração de P pela cana-de-açúcar sob fontes e doses de fósforo associado com torta de filtro, Agudos-SP, 2015.

Tratamento	NPm	ATR	TPH	Prod	Fol	Col	Pon	Tot	PFol	PCol	PPon	PTot
t ha ⁻¹								kg ha ⁻¹				
Controle Com	9,1	18,7	22,1	133,7	9,9	30,2	4,1	44,2	1,9	10,1	4,9	17,0
Controle Sem	8,4	17,6	20,7	119,4	7,1	27,5	4,3	38,8	1,3	7,2	4,4	13,0
Torta Com	9,1	18,9	22,4	127,1	8,5	32,7	4,6	45,8	1,8	13,1	5,7	20,6
(T) Sem	9,0	19,7	23,4	133,1	8,9	32,3	4,6	45,8	1,8	11,0	5,4	18,1
Fonte ST	9,4	19,8	23,5	133,2	8,7	33,5	4,9	47,2	1,8	12,2	6,0	20,1
(F) FNR	8,7	18,8	22,3	127,0	8,7	31,5	4,3	44,4	1,8	11,9	5,0	18,7
Dose 90	9,1	19,4	23,1	129,9	9,0	33,9	4,6	47,4	1,9	12,2	5,5	19,6
(D) 180	9,1	19,2	22,8	130,4	8,4	31,1	4,6	44,2	1,6	11,9	5,5	19,1
Efeito	Teste F											
T	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
F	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
D	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
TxF	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**	ns	ns
TxD	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
FxD	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns
TxFxD	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
CV%	7	6	6	7	17	16	17	15	16	16	17	15
Contrastes												
C vs C Torta	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns
C vs Trat	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	***	ns	**
C vs Trat Com	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	<***	ns	***
C vs Trat Sem	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	*	**	ns	*
C vs ST	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	*	***	*	**
C vs FNR	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	***	ns	**
C vs dose 90	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	***	ns	**
C vs dose 180	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	***	ns	**

NPm = número por metro de planta, ATR = açúcar total recuperável, TPH = tonelada de Pol por hectare, Prod = produtividade, Fol, Col, Pon e Tot = massa seca da folha, colmo, ponteiro e total, respectivamente. PFol, PCol, PPon e PTot = fósforo na folha, colmo, ponteiro e total, respectivamente. ST = superfosfato triplo, FNR = fosfato natural reativo. CV = coeficiente de variação. Trat = tratamento. <***, ***, **, * e ns, significativo a menos de 0,1%, 0,1, 1 e 5% e não significativo, respectivamente.

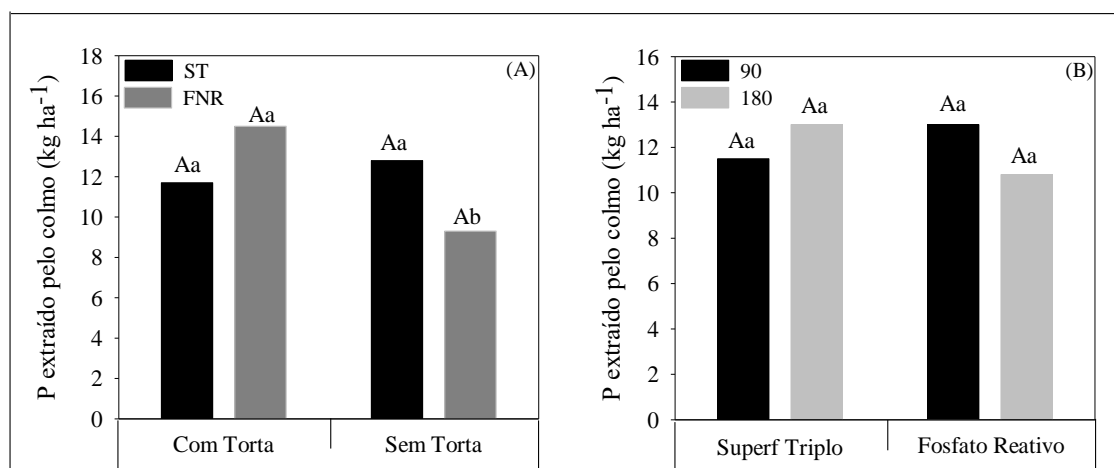


Figura 23. Desdobramento da interação do P extraído pelo colmo da cana-de-açúcar em fontes e doses de fósforo com e sem aplicação de 10 t ha⁻¹ de torta de filtro em Agudos 2015. Torta x fonte de P (A) e fonte x dose de P (B). Letras minúsculas comparam as fontes na presença ou na ausência de torta ou cada dose na fonte super triplo ou no fosfato reativo e maiúsculas comparam cada fonte na ausência e na presença de torta ou cada dose na fonte super triplo e no fosfato reativo pelo teste de Tukey (p < 0,05).

A comparação de cada fonte na ausência e na presença de torta não mostrou diferenças significativas. A interação fonte x dose para o P extraído pelo colmo não foi confirmada pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$) (Figura 23 B).

O efeito da torta de filtro diminuiu ou foi nulo no segundo ciclo da cana. No entanto, Rodella, Silva e Orlando Filho (1990) observaram efeito da torta de filtro até 30 meses após a aplicação, mas estes autores aplicaram 100 t ha^{-1} incorporada com o volume de solo da camada arável, uma dose muito maior que a utilizada neste estudo. Fravet et al. (2010) observaram que a aplicação da torta de filtro na segunda soca aumentou a produtividade de colmos industrializáveis e o rendimento em sacarose, atingindo o máximo com a aplicação de cerca de 60 t ha^{-1} de torta de filtro, mas o aumento da quantidade de torta aplicada diminuiu o Brix do caldo e a pol.

No presente estudo foram aplicadas 20 t ha^{-1} em base úmida ou mais precisamente 10 t ha^{-1} em base seca, no fundo do sulco, na implantação do canavial. Os nossos resultados indicam que a torta de filtro teve grande importância no ciclo de cana planta e que exerceu pouca ou nenhuma influência nos ciclos subsequentes. O efeito residual da torta de filtro nas soqueiras estão mais relacionados com doses acima de 50 t ha^{-1} ou com a aplicação de menores quantidades no sulco, associadas com uma dosagem maior em área total (MOBERLY; MEYER, 1978; RODELLA; SILVA; ORLANDO FILHO, 1990; GILBERT et al., 2008; FRAVET et al., 2010)

Os resultados da eficiência agrônômica e industrial e eficiência de recuperação do P adicionado ao solo via torta de filtro e/ou fertilizantes fosfatados minerais são apresentados na tabela 18. No ciclo de cana planta em Agudos (2014) verifica-se uma mesma tendência para as fontes, independentemente da dose aplicada para o colmo, ATR e TPH.

Na ausência da fonte orgânica, observa-se que o FNR diminuiu a sua eficiência em relação a fonte solúvel (ST), principalmente na dose de 180 kg ha^{-1} de P_2O_5 (Tabela 18). A distribuição de grandes quantidades de FNR de forma localizada deve ter influenciado o seu comportamento na presença da torta de filtro. Possivelmente isso foi mascarado em função da torta ter suprido a planta em P e outros nutrientes, além de contribuir para a manutenção da umidade do solo, uma vez que houve déficit hídrico nesse ano. Pode também ter ocorrido sobreposição das zonas de difusão de P ao redor ou em volta das partículas, fazendo com que a proporção do fosfato de rocha dissolvido no solo diminua com o aumento da quantidade aplicada (BARROW; BOLLAND, 1990).

Tabela 18. Eficiência agronômica e industrial e aproveitamento pela cana-de-açúcar do fósforo aplicado no solo em fontes e doses de fósforo associadas com torta de filtro em Agudos e Macatuba, no período 2014 a 2015.

Tratamento	Eficiência Agronômica e industrial								Eficiência do P recuperado	
	Colmo		ATR		TPH		M Seca total		COM	SEM
	COM	SEM	COM	SEM	COM	SEM	COM	SEM		
Agudos 2014 - cana planta										
	kg kg ⁻¹								-----%-----	
Sem P	173	ND	23	ND	25	ND	0	ND	1.7	ND
ST90	136	326	18	34	21	38	34	-93	4.3	0.6
ST180	122	220	16	31	17	38	34	14	2.7	2.2
FNR90	136	119	18	14	21	18	6	84	2.3	9.0
FNR180	129	44	19	2	22	0	33	-68	2.6	-0.6
Agudos 2015 - cana soca (1 ^a)										
Sem P	115	ND	-2	ND	11	ND	43	ND	3.2	ND
ST90	73	388	2	32	13	88	34	273	3.7	16.5
ST180	46	239	0	19	10	46	32	133	3.5	11.2
FNR90	31	245	-1	8	10	53	63	195	6.0	11.0
FNR180	22	145	-3	-2	5	20	26	-12	3.7	1.5
Agudos 2014-2015 - cana planta + cana soca										
Sem P	287	ND	21	ND	36	ND	43	ND	4.9	ND
ST90	210	714	20	66	35	126	68	181	8.1	17.1
ST180	168	459	16	49	27	84	67	147	6.1	13.4
FNR90	167	364	17	22	31	72	70	279	8.3	20.0
FNR180	151	189	15	0	28	20	59	-79	6.3	0.9
Macatuba 2015 - cana planta										
Sem P	66	ND	11	ND	13	ND	24	ND	2	ND
ST90	38	97	8	24	9	27	23	23	2	-5
ST180	21	5	3	17	3	20	4	33	1	-2
FNR90	58	38	9	11	11	10	18	-51	2	-4
FNR180	20	83	4	22	4	26	1	-19	2	-1

ATR = açúcar total recuperável, TPH = tonelada de pol por hectare, COM e SEM = presença e ausência da aplicação de 10 t ha⁻¹ de torta filtro (base seca), Sem P = não foi aplicado fósforo de fertilizante inorgânico, apenas o fósforo orgânico da torta de filtro, ST = superfosfato triplo, FNR = fosfato natural reativo, 90 e 180 = doses de P₂O₅ aplicadas no fundo do sulco, ND = não determinado.

Para se ter uma idéia da baixa eficiência da fonte reativa na maior dose utilizada, vamos utilizar o exemplo da tabela 18, no qual a variedade RB86-7515, na ausência de torta, usou um 1 kg de P para produzir 44 kg de colmo. Multiplicando-se o valor 44 pela quantidade de P aplicada obteremos aproximadamente 3,5 t ha⁻¹ de colmo industrializável. O tratamento controle, ou melhor, o P oriundo do solo produziu 110,2 t ha⁻¹ de colmo (Tabela 15). Somando-se esses dois resultados encontraremos o rendimento total do FNR, que seria de 113,7 t ha⁻¹. Usando o mesmo raciocínio para o ST na dose de 90 kg ha⁻¹ de P₂O₅ obtem-se um rendimento de 25,6 t ha⁻¹ ou 135, 8 t ha⁻¹ de colmo, considerando-se o P admitido ser oriundo da reserva do solo, conforme preconiza o método da diferença (CHIEN et al., 2012). Em termos percentuais, o rendimento do tratamento que não recebeu P, responderia por 97 e 81% do rendimento total do FNR na dose de 180 e do ST na dose de 90, respectivamente.

Esses dois tratamentos apresentaram eficiência de produção de massa seca negativa, o que indica produção menor que no tratamento controle. Por outro lado, o ST na dose de 90 parece ter compensado com uma maior quantidade de caldo no colmo, que foi transformada

em ATR e TPH (Tabela 18). A eficiência de recuperação do P aplicado ao solo foi melhor com a aplicação de torta comparado com a ausência da fonte orgânica, exceto para o FNR na dose de 90, o qual produziu mais massa seca e, conseqüentemente, maior quantidade de P total extraído (Tabela 18).

No segundo ano de colheita do experimento de Agudos (1ª soca), observa-se que quando são inseridos os 125 kg ha⁻¹ de P contidos nas 10 t ha⁻¹ de torta aplicadas (1,25% de P na MS), a quantidade de colmo, ATR e TPH produzida por kg de P aplicado diminuiu. Isso é função do que preconiza o método da diferença, ou seja, a determinação da eficiência é feita pela quantidade produzida por determinado tratamento menos o rendimento do controle, dividido pela quantidade de fertilizante aplicada. Quando se aplicou a dose de 90 kg ha⁻¹ de P₂O₅, na presença da torta (+125 kg ha⁻¹ de P), o total de P aplicado foi de 164,3 kg ha⁻¹ de P e de 203,6 kg ha⁻¹ de P na dose de 180 kg ha⁻¹, que representa um aumento de 3,2 e 1,6 vez no denominador em relação aos tratamentos na ausência da torta.

Como no segundo ano, o rendimento dos tratamentos sem torta foi similar aos que receberam aplicação de torta (Tabela 18), isso fez com que a eficiência fosse baixa ou até mesmo negativa (Tabela 18), sendo o efeito da aplicação da torta de filtro somente observado no ciclo de cana planta. Caione et al. (2015), observaram efeito positivo da adição de 7,5 t ha⁻¹ em base de massa seca, associada com fertilizantes minerais, no rendimento da cana e no aumento do P do solo. Rodella, Silva e Orlando Filho (1990), observaram que a aplicação de 10 t ha⁻¹ de torta de filtro no fundo do sulco foi suficiente para atender a demanda de P da cana planta, já a associação com até 150 kg ha⁻¹ de P inorgânico não alterou a produtividade. Prasad (1976), reportou que não se faz necessário a adição de fertilizante fosfatado para a cana planta quando doses a partir de 20 t ha⁻¹ de torta são utilizadas.

No ciclo de cana soca, verificou-se que a fonte reativa melhorou a eficiência para o colmo, ATR e TPH e na recuperação do P aplicado (Tabela 18), mas a dose de 180 kg ha⁻¹ apresentou eficiência inferior ao controle para ATR e produção de massa seca, além da baixa eficiência do P aplicado, sendo 7 vezes menor que o recuperado na dose de 90 para essa mesma fonte (Tabela 18). Os resultados dos dois anos (cana planta + 1ª soca) mostraram o aumento da eficiência agrônômica e industrial e também da quantidade de P recuperado em função da maior produtividade e extração de P de 20% pela cana-de-açúcar no ciclo de 1ª soca (Tabela 17) em comparação com a cana planta (Tabela 15), embora esse valor ainda seja relativamente baixo, típico de nutriente de baixa mobilidade como o P (GOH; CONDRON, 1989).

No experimento de Macatuba observaram-se eficiências muito baixas na cana planta para o rendimento de colmo, ATR e TPH e uma recuperação negativa de P para todos os tratamentos que não receberam torta de filtro (Tabela 18). O ST na dose de 180 kg ha⁻¹ de P₂O₅ produziu somente 0,4 t ha⁻¹ de colmo a mais, que somados às 157,3 t ha⁻¹ produzidas pelo controle (Tabela 16) chega a 157,7 t ha⁻¹. Concordando com nossos resultados, destaca-se na literatura que a torta de filtro apresenta maior importância em cana planta, principalmente em solos arenosos e muito pobres em P disponível para as plantas (PRASAD, 1976), mas isso não se comprovou em solos argilosos também com teores baixos de P.

O comportamento observado em relação aos dados do rendimento agrícola e industrial, massa seca e extração de P no solo de Macatuba (Tabela 16), juntamente com os dados de eficiência e de recuperação do P aplicado ao solo (Tabela 18), indicam que esse solo tinha P disponível suficiente para atender a demanda da cana-de-açúcar pelo menos no ciclo de cana planta, em função das adubações recebidas ao longo de décadas de cultivos com essa cultura. Pesquisadores têm observado em experimentos de campo que adição de fosfato ao solo melhora a eficiência de aproveitamento do P aplicado em função dos sítios de alta adsorção serem previamente saturados (BARROW; BOLLAND; ALLEN, 1998; WANG et al., 2015). Outros têm sugerido que solo com boas quantidades de P residual, decorrente de sequência de fertilizações anteriores, deve ser avaliado para a possibilidade de diminuir o nível crítico, visando-se fazer o uso mais sustentável do estoque de P do solo e diminuir o consumo crescente das reservas desse elemento (ROWE et al., 2016).

3.3.2 Fracionamento do P do solo

A) Experimento de Agudos (Ano agrícola 2014)

A interação entre os fatores torta de filtro x fonte x dose de P aplicadas ao solo não foi observada para nenhuma das frações de P avaliadas no solo no ciclo de cana planta (2014), na camada 0-20 cm (Tabela 19). A adição de 10 t ha⁻¹ de torta de filtro alterou de forma isolada apenas a fração Po-hid0.1. Essa fração foi diminuída com a aplicação da torta de filtro, caindo de 18,7 mg kg⁻¹, no tratamento sem torta, para 16,5 mg de P kg⁻¹ de solo na presença do fertilizante orgânico (Tabela 19). A baixa influência da torta de filtro pode ser indicativo da sua distribuição em profundidades maiores que 20 cm. As fontes de P foram as maiores responsáveis pelas mudanças ocorridas nas frações de P do solo na camada 0-20 cm, alterando desde frações lábeis até não lábeis.

As alterações ocorreram mais significativamente nas frações inorgânicas, exceto para a fração orgânica Po-bic. A alteração predominantemente das formas inorgânicas de P pela adição de fertilizantes fosfatados está em acordo com Conte; Anghinoni e Rheinheimer (2003), que estudando as formas preferenciais de acumulação do fertilizante fosfatados adicionado anualmente ao solo, durante cinco anos, observaram que os incrementos no P-total do solo ocorreram exclusivamente na forma inorgânica.

A fração lábil Pi-bic teve o seu teor elevado em mais de duas vezes pela fonte solúvel (ST) em relação à fonte reativa (FNR), o que implicou na elevação dessa fração de $8,8 \text{ mg kg}^{-1}$ no FNR para $20,6 \text{ mg kg}^{-1}$ no ST. Comportamento inverso dessas fontes foi observado para a fração Po-bic, para a qual o FNR foi mais efetivo do que o ST em aumentar os seus teores (Tabela 19).

A fração Pi-hid0.1 foi aumentada em 50% pelo ST em relação ao FNR, com valores de $30,5 \text{ mg kg}^{-1}$ e 20 mg kg^{-1} de solo para o ST e FNR, respectivamente. A fração ácida P-HCl (P-Ca) foi aumentada pela fonte reativa em mais de 14 vezes em relação à fonte solúvel, alcançando teores de $80,5$ para o FNR e apenas 6 mg kg^{-1} para o ST, em virtude do extrator ácido P-HCl solubilizar formas de fosfato não dissolvida, como fosfato de cálcio ou apatita. A fonte reativa também promoveu aumento na fração não lábil Pi-hid0.5 (Tabela 19). Em pesquisa com superfosfato e fosfato reativo Simmonds et al. (2016) observaram que as frações de P encontradas para o fosfato reativo eram constituídas principalmente por P-HCl e P-NaOH0.5 ou recalcitrante. As doses alteraram o P-total e o P-não lábil do solo, acompanhando o aumento da dose de 90 para 180 kg ha^{-1} de P_2O_5 . O incremento foi de 34 e 12% para o P-total e P-não lábil, respectivamente.

A comparação por meio de contraste com o tratamento controle mostra que todas as frações orgânicas, a fração Pi-hid0.1, o P-residual e o P-não lábil não foram influenciadas pela adição de fertilizante orgânico e/ou mineral. O controle com torta não diferiu do controle sem torta para nenhuma das frações e reservatórios de P do solo. De forma geral, a adição de somente fertilizante fosfatado mineral ou em associação com a torta de filtro alteraram as frações lábeis P-resina e Pi-bic. Observou-se ainda efeito para o P-HCl, exceto para os tratamentos com torta de filtro, ST e a dose de 90 kg ha^{-1} de P_2O_5 . A fração Pi-hid0.5 foi alterada apenas pela fonte reativa (FNR) e pela dose de 180 kg ha^{-1} de P_2O_5 (Tabela 19).

A falta de efeito da fertilização na fração Pi-hid0.1 não era esperada, sendo discordante com outros resultados que confirmaram o aumento na fração Pi-hi0.1 com a adição de fertilizante, com o aumento da dose de fertilizante e com o tempo de contato com o solo (OCHWOH; CLAASSENS; DE JAGER, 2005; WANG et al., 2014). Possivelmente a

falta de influência da adição de fertilizante nesta fração de P está associada a baixa capacidade de adsorção do solo em função da sua mineralogia ser composta principalmente por caulinita e óxidos de Al, e/ou pelo tempo de contato de apenas um ano, que deve não ter sido suficiente para a adsorção do P adicionado a esse solo.

A adição de 10 t ha⁻¹ de torta de filtro no sulco na implantação do canavial influenciou de forma isolada a fração Pi-hid0.1 e o P-inorgânico do solo na camada de 20-40 cm (Tabela 20). Os teores de Pi-hid0.1 foram de 21,6 mg kg⁻¹ na ausência de torta, cerca da metade dos 42,6 mg kg⁻¹ de P kg⁻¹ de solo nos tratamentos com adição de torta de filtro. O P-inorgânico foi maior na presença de torta, com 243,3 mg kg⁻¹, valor quase duas vezes maior que os 132,9 mg kg⁻¹ encontrados nos tratamentos sem a aplicação de torta de filtro. A camada de 20-40 cm deve concentrar a maior parte da torta distribuída no sulco de plantio em relação a camada 0-20 cm, em vista da maior interação ocorrida nesta camada (Tabelas 19 e 20). As fontes alteraram a fração P-resina e o P-lábil em função do P-resina ser componente desse compartimento de P. A fonte solúvel promoveu maiores alterações nessas formas de P que a fonte reativa, com teores de 16,4 e 8,8 mg kg⁻¹; e 55,3 e 37 mg kg⁻¹ para o P-resina e P-lábil, respectivamente (Tabela 20). O P-não lábil aumentou com o aumento da dose, sendo de 84,1 e 93,8 mg kg⁻¹ para as doses de 90 e 180 kg ha⁻¹ de P₂O₅, respectivamente (Tabela 20). Também na camada de 20-40 cm a comparação por meio de contraste entre o controle com torta e o controle sem torta mostrou diferença apenas para o P-resina e o Po-hid0.5. Os contrastes mostram que a adição de fertilizantes alterou as frações de P do solo. As maiores alterações, considerando-se os níveis de significâncias, foram nas frações lábeis P-resina e Pi-bic; na fração moderadamente lábil P-HCl, exceto ST e na fração não lábil Po-hid0.5, influenciada principalmente pelo FNR e pela dose de 180 kg ha⁻¹ de P₂O₅ (Tabela 20). A fração Pi-hid0.1 sofreu alteração apenas quando a adição de fertilizante inorgânico foi associada com torta de filtro (Tabela 20), destacando a importância dessa fonte de P para o solo. Embora não tenha sido detectada na camada de 0-20 cm, possivelmente em função da profundidade de distribuição e da amostragem.

As consequências dessas alterações promoveram incrementos no P-total, P-lábil e P-inorgânico do solo, este último parece ter sua elevação relacionada com a adição de torta e com a quantidade de fertilizante inorgânico adicionada. Wang et al. (2014) verificaram que a adição de fertilizantes eleva os teores de P-inorgânico e aumenta a sua participação no P total do solo.

Tabela 20. Médias de frações de fósforo (mg kg^{-1}), teste F e contraste de amostras de solo da camada 20-40 cm cultivado com cana-de-açúcar em fontes e doses de fósforo associadas com torta de filtro, Agudos-SP, 2014.

Tratamento	P-res	Pi-bic	Po-bic	Pi-hid 0.1	Po-hid 0.1	P-HCl	Pi-hid 0.5	Po-hid 0.5	P-resid	P total	P-lábil	P Mod lábil	P-Não lábil	P inorg	P org	
mg kg^{-1}																
Controle (C)	2,3	6,5	13,6	26,4	23,2	1,8	25,3	1,1	43	143	22,3	51,7	70,0	105,3	38,0	
Controle torta	14,8	9,6	5,3	28,5	24,1	3,8	22,7	6,2	56	168	26,7	56,3	85,0	132,0	35,7	
Torta (T)	Com	19,4	34,0	10,9	42,6a	45,1	59,9	27,6	5,5	65	304	64,0	142,7	97,8	243,3a	61,3
	Sem	4,9	14,3	8,7	21,6b	26,4	19,1	25,6	7,5	47	176	28,3	67,2	80,1	132,9b	42,8
Fonte (F)	ST	16,4a	18,0	9,3	40,5	24,8	4,9	21,5	5,0	63	215	55,3a	70,2	89,3	175,8	39,2
	FNR	8,8b	30,3	10,3	23,8	46,7	75,5	31,7	7,9	49	265	37,0b	139,7	88,7	200,5	64,8
Dose (D)	90	13,6	25,7	8,8	33,0	24,9	15,4	24,5	4,2	55	206	48,3	73,3	84,1b	167,6	38,1
	180	11,1	22,6	10,8	31,3	46,6	64,0	28,7	8,7	56	274	44,0	136,5	93,8a	208,7	65,9
Efeito	Teste F															
T	*	**	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns	*	ns	
F	*	*	ns	ns	ns	**	**	ns	ns	ns	**	ns	ns	ns	ns	
D	ns	ns	ns	ns	ns	**	ns	ns	ns	*	ns	*	*	ns	ns	
TxF	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	
TxD	*	ns	ns	ns	ns	**	ns	ns	ns	*	**	ns	ns	ns	ns	
FxD	ns	ns	ns	ns	ns	**	*	ns	ns	*	ns	*	ns	*	ns	
TxFxD	ns	*	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	
CV%	3	3	57	3	19	4	7	34	15	16	2	16	11	5	16	
Contrastes																
C vs C Torta	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	
C vs Trat	<***	***	ns	ns	ns	***	ns	*	ns	**	<***	ns	ns	**	ns	
C vs Trat Com	<***	<***	ns	*	ns	<***	ns	*	*	***	<***	*	*	<***	ns	
C vs Trat Sem	***	*	ns	ns	ns	**	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	
C vs ST	<***	***	ns	ns	ns	ns	ns	*	*	*	<***	ns	ns	**	ns	
C vs FNR	<***	**	ns	ns	ns	<***	ns	**	ns	**	**	ns	ns	**	ns	
C vs dose 90	<***	***	ns	ns	ns	**	ns	*	ns	*	***	ns	ns	*	ns	
C vs dose 180	<***	**	ns	ns	ns	<***	ns	**	ns	**	<***	ns	*	***	ns	

ST = superfosfato triplo, FNR = fosfato natural reativo, CV% = coeficiente de variação, Trat = tratamento. Frações P-res = P extraído pela resina, Pi-bic e Po-bic = P inorgânico e orgânico extraídos pelo NaHCO_3 , Pi-hid 0.1 e Po-hid 0.1 = P inorgânico e orgânico extraído pelo NaOH 0,1, P-HCl = P extraído pelo HCl, Pi-hid 0.5 e Po-hid 0.5 = P inorgânico e orgânico extraído pelo NaOH 0,5, P-resid = P residual. P total = soma de todas as frações; P lábil = P-res + Pi-bic + Po-bic; P Moderadamente lábil = Pi-hid 0.1 + Po-hid 0.1 + P-HCl; P-Não lábil = Pi-hid 0.5 + Po-hid 0.5 + P-resid. P inorgânico = P-res + Pi-bic + Pi-hid 0.1 + P-HCl + Pi-hid 0.5 + P-resid. P orgânico = Po-bic + Po-hid 0.1 + Po-hid 0.5. ***, * e ns significativo a 0,1, 1% e não significativo, respectivamente.

A associação de fertilizante inorgânico e orgânico de concentrações relativamente altas de P e em doses altas conseguiu quase dobrar os teores de P-inorgânico e total do solo em comparação com aplicação isolada do fertilizante inorgânico, após 22 anos de sua contínua aplicação (DAMON et al., 2014; WANG et al., 2014).

A exceção do P-resina e do P-HCl, os tratamentos sem torta de filtro apresentaram pouca influência na alteração das frações de P do solo quando comparado com o controle por meio de contrastes. O P-orgânico do solo não se alterou com a adição de fertilizantes. A exceção neste estudo foi o Po-hid0.5, que foi alterado principalmente pelo FNR e pela dose de 180 kg ha⁻¹ de P₂O₅. Tem sido observado que adição de fertilizantes inorgânico ao solo promove grande aumento nas frações inorgânicas P-resina, Pi-bic e Pi-hid0,1 mas não em frações orgânicas (DOBERMANN; GEORGE; THEVS, 2002; ZHENG et al., 2002; SIMMONDS et al., 2016) e que essas são potencializadas quando combinadas com fontes orgânicas de fertilizantes contendo concentrações relativamente altas de P, a exemplo da torta de filtro (CAIONE et al., 2015). A fração Pi-hid0.1 foi pouco influenciada pelos fertilizantes um ano após a sua aplicação nas camadas 0-20 e 20-40 cm em comparação com o tratamento controle (Tabelas 19 e 20).

Observou-se interação dos fatores torta x dose para as frações P-resina, P-HCl, P-total e P-lábil (Tabela 20). As doses de P não alteraram a fração P-resina com a aplicação ou não de torta de filtro (Figura 24).

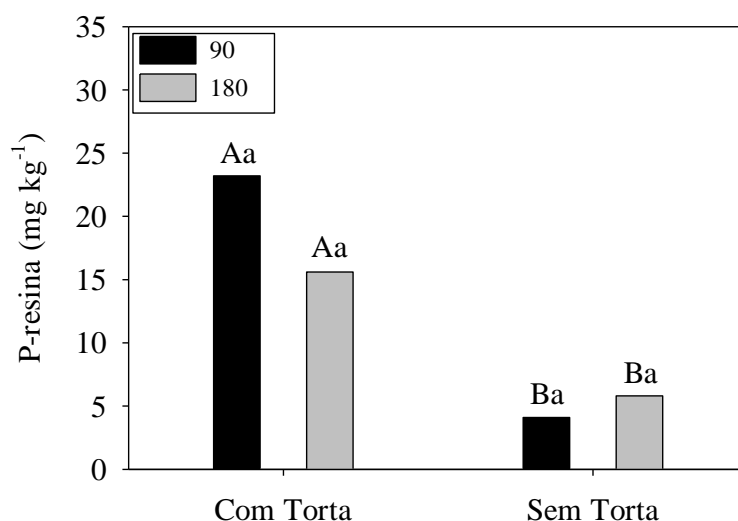


Figura 24. Desdobramento da interação dupla da fração P-resina do solo (20-40 cm) cultivado com cana-de-açúcar em doses de fósforo na presença e ausência de 10 t ha⁻¹ de torta de filtro, Agudos 2014. Letras minúsculas compara as doses na presença ou na ausência de torta de filtro e maiúsculas comparam cada dose na presença e na ausência de torta pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

A comparação da mesma dose na presença e ausência de torta de filtro mostrou que o P-resina foi aumentado na presença do fertilizante orgânico para as duas doses avaliadas, com

teores de 23,2 e 15,6 mg de P kg⁻¹ na presença e de 4,1 e 5,8 mg de P kg⁻¹ na ausência de torta de filtro, para as doses de 90 e 180 kg ha⁻¹ de P₂O₅, respectivamente (Figura 24). Isso indica que na presença de torta de filtro poderia ser utilizada a metade da dose de P recomendada via fertilizante mineral para a cana, no ciclo de cana planta (RAIJ et al., 1997).

A aplicação de torta de filtro fez com que a dose de 90 kg ha⁻¹ de P₂O₅ (metade da dose recomendada) aumentasse os teores do P-HCl em comparação com a sua aplicação sozinha, sem a adição de torta. Isso não ocorreu para a dose recomendada de 180 kg ha⁻¹ de P₂O₅ (Figura 25). O P-total do solo da camada 20-40 cm não foi alterado pelas doses de P quando estas foram associadas com o fertilizante orgânico torta de filtro. Quando se aplicou apenas os fertilizantes minerais, o P-total do solo foi aumentado com o aumento da dose, elevando-se de 145 para 206 mg kg⁻¹ (Figura 26).

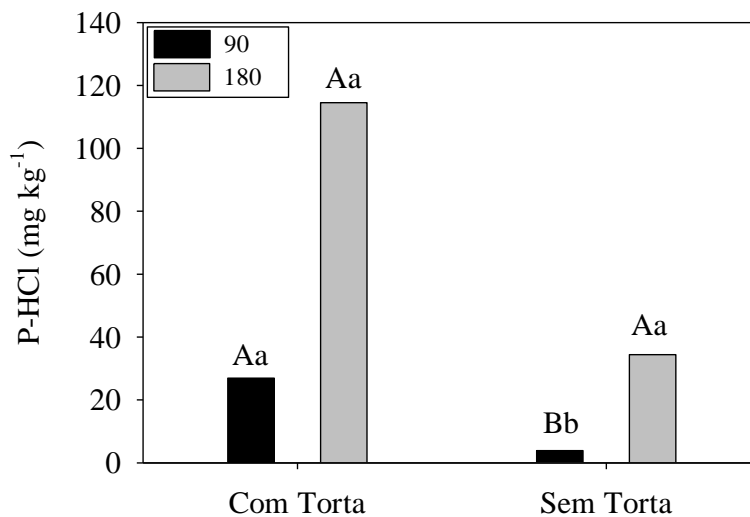


Figura 25. Desdobramento da interação dupla da fração P-HCl do solo (20-40 cm) cultivado com cana-de-açúcar em doses de fósforo na presença e ausência de 10 t ha⁻¹ de torta de filtro, Agudos 2014. Letras minúsculas compara as doses na presença ou na ausência de torta de filtro e maiúsculas comparam cada dose na presença e na ausência de torta pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

A comparação de cada dose, na presença ou ausência da fonte orgânica, mostrou que a aplicação de 90 kg ha⁻¹ de P₂O₅ aumentou o P-total do solo de 145 sem torta para 266 mg de P kg⁻¹ na presença da torta de filtro (Figura 26). Isso sugere que o efeito da torta não foi significativo à medida que se aumentou a dose de P, pois a dose de 180 kg ha⁻¹ de P₂O₅ (dose recomendada para a cana) não mostrou diferença quando foi aplicada na ausência ou na presença da torta de filtro. Os resultados obtidos para o P-total mostram duas situações em relação ao manejo adotado para a adubação fosfatada da cana-de-açúcar em ciclo de cana planta, pelo presente estudo i) diminuir a dose para metade da dose recomendada com a aplicação das 10 t ha⁻¹ de torta de filtro ou ii) aplicar a dose recomendada sem a aplicação de torta de filtro.

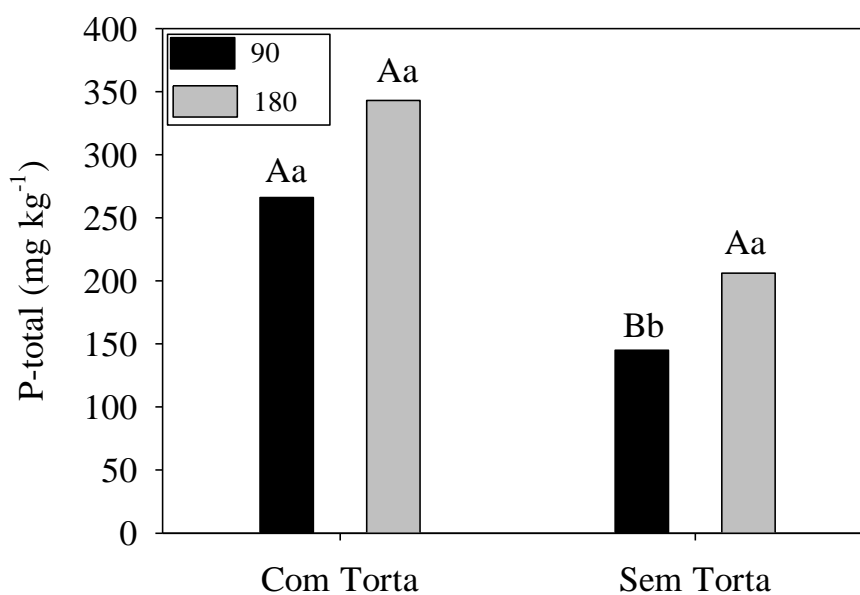


Figura 26. Desdobramento da interação dupla da fração P-total do solo (20-40 cm) cultivado com cana-de-açúcar em doses de fósforo na presença e ausência de 10 t ha⁻¹ de torta de filtro, Agudos 2014. Letras minúsculas compara as doses na presença ou na ausência de torta de filtro e maiúsculas comparam cada dose na presença e na ausência de torta pelo teste de Tuhey ($p < 0,05$).

O P-lábil não foi alterado significativamente pelas doses na presença de torta de filtro (Figura 27).

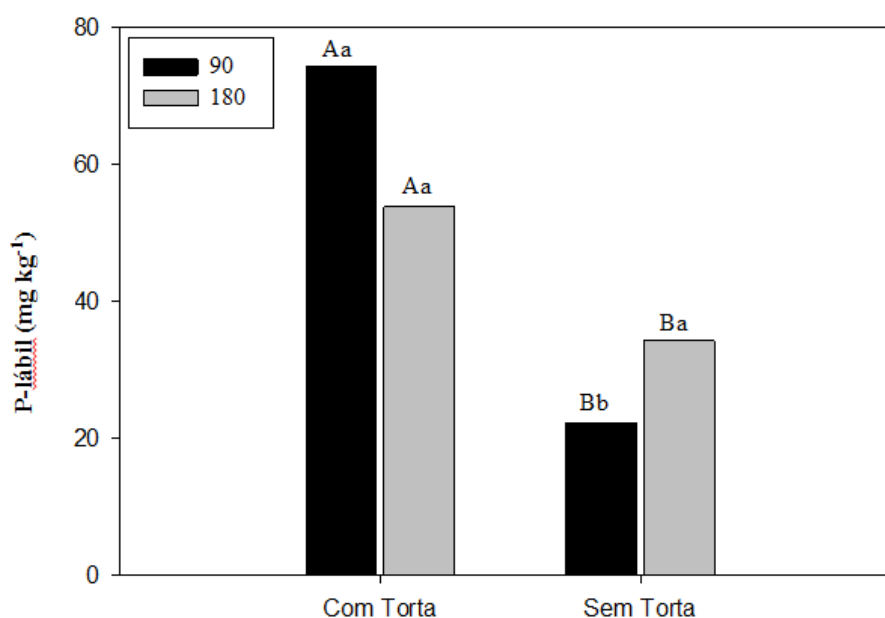


Figura 27. Desdobramento da interação dupla da fração P-lábil do solo (20-40 cm) cultivado com cana-de-açúcar em doses de fósforo na presença e ausência de 10 t ha⁻¹ de torta de filtro, Agudos 2014. Letras minúsculas compara as doses na presença ou na ausência de torta de filtro e maiúsculas comparam cada dose na presença e na ausência de torta pelo teste de Tuhey ($p < 0,05$).

Na ausência da torta, o P-lábil foi maior com o aumento da dose. A aplicação da dose recomendada (180 kg ha⁻¹) e de metade desta (90 kg ha⁻¹) elevaram os teores do P-lábil do

solo em 1,6 e 3,3 vezes, respectivamente, quando foram associadas com a torta de filtro em comparação com a sua aplicação sem essa fonte orgânica. Os teores foram de 53,8 e 74,2 mg kg⁻¹ na presença e de 34,2 e 22,3 mg kg⁻¹ na ausência da torta para as doses de 180 e 90 kg ha⁻¹ de P₂O₅, respectivamente (Figura 27).

Os resultados da interação entre os fatores fonte x dose de P nas frações P-HCl e Pi-hid0.5 na camada de solo de 20-40 cm, um ano após a aplicação dos fertilizantes são apresentados na figura 28.

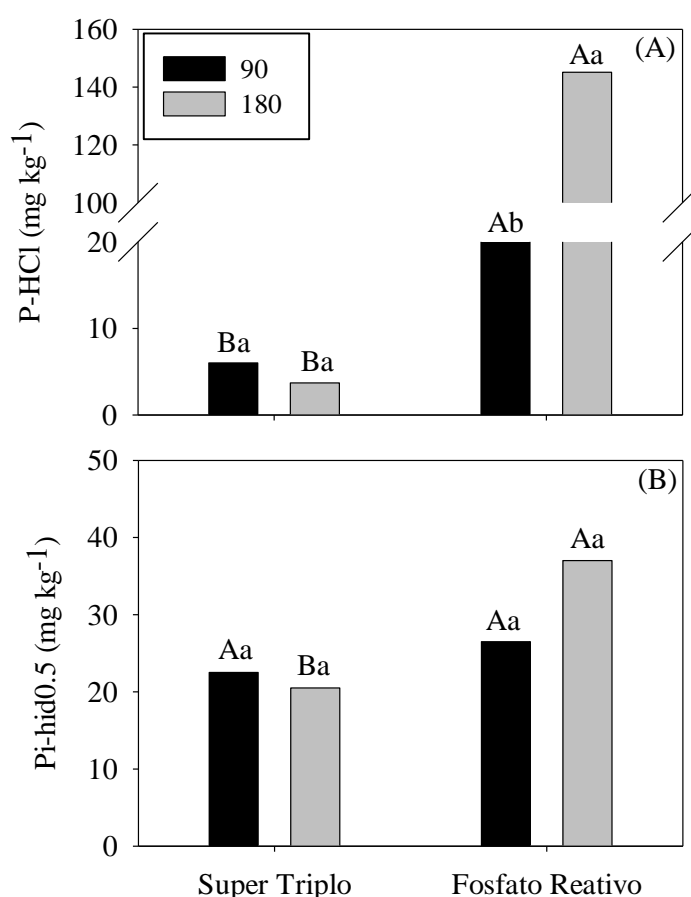


Figura 28. Desdobramento da interação dupla das frações P-HCl e Pi-hid0.5 do solo (20-40 cm) cultivado com cana-de-açúcar em fontes e doses de fósforo, Agudos 2014. P-HCl (A) e Pi-hid0.5 (B). Letras minúsculas compara as doses em cada fonte e maiúsculas compararam as fontes em cada dose pelo teste de Tuhey ($p < 0,05$).

O P-HCl não foi alterado com o aumento da dose para o ST (Figura 28 A). Quando a fonte utilizada foi o FNR, observou-se alteração nesta fração de P com o aumento da taxa de P aplicada. Os teores foram de 25 mg kg⁻¹ na dose de 90 e de 145 mg kg⁻¹ para a dose de 180 kg ha⁻¹ de P₂O₅ (Figura 28 A).

As doses de 90 e de 180 kg ha⁻¹ de P₂O₅ foram capazes de elevar os teores da fração P-HCl na fonte reativa em relação às respectivas doses na fonte solúvel (Figura 28 A). A essa fração de P, atribue-se ser formada por Pi ligado a minerais ricos em cálcio, principalmente

apatita (HEDLEY; STEWART; CHAUHAN, 1982), sendo esses minerais prontamente dissolvidos pelo suprimento de prótons fornecidos em baixas condições de pH (SAGOE et al., 1998), o que não acontece para o ST em função deste ter sido dissolvido por ácido durante o processo de fabricação.

O P ligado a cálcio extraído da fonte reativa pelo extrator P-HCl não está disponível para ser utilizado pela planta no curto prazo, devendo ser liberado gradativamente, dependendo de fatores do solo, como pH mais baixo, alta capacidade de troca de cátions para funcionar como dreno de cálcio, menor concentração de cálcio e de fosfato na solução do solo, etc. (KHASAWNEH; DOLL, 1978; SANYAL; DE DATTA, 1991).

A fração Pi-hid0.5 não foi alterada pelas doses de fertilizantes fosfatados adicionadas ao solo independente da fonte, embora o FNR tenha apresentado tendência de valores maiores (Figura 28 B). A comparação das fontes em cada dose de P mostrou que não houve diferenças entre as duas fontes para a dose de 90 kg ha⁻¹ de P₂O₅. O aumento da dose para 180 kg ha⁻¹ de P₂O₅ mostrou que o FNR elevou os teores da fração Pi-hid0.5 em 1,8 vez em relação ao ST, alcançando o valor de 37 mg de P kg⁻¹ de solo (Figura 28 B), sugerindo o potencial do FNR em transformar o P para formas não lábeis.

O P-total, P-moderadamente lábil e P-inorgânico do solo não foram alterados pelas doses de P aplicadas quando a fonte utilizada para fornecer o nutriente foi ST (Figura 29 A, 29 B e 29 C). Observou-se alterações nestas frações quando as quantidades de P recomendadas foram fornecidas na forma de FNR.

O mesmo comportamento foi observado para as três frações, onde os teores aumentou com a elevação da dose de 90 para 180 kg ha⁻¹ de P₂O₅. Não houve diferença entre as fontes para cada dose, exceto para o P-moderadamente lábil. Esse compartimento de P foi mais de três vezes maior na dose de 180 kg ha⁻¹ de P₂O₅, na forma de FNR que na forma de ST (Figura 29 B), em função dos altos teores apresentados pela fração P-HCl, compondo 145 mg kg⁻¹ (Figura 28 A) dos 208 mg kg⁻¹ total observados para o P-moderadamente lábil (Figura 29 B).

No ciclo de cana planta em Agudos (2014), observou-se interações triplas entre torta x fonte x dose de P para as frações Pi-bic e Po-hid0.1 na camada de 20-40 cm (Figura 30). Não foram observadas diferenças das doses e fontes na presença ou na ausência de torta de filtro para a fração Pi-bic (Figura 30 A e 30 B). A torta de filtro apresentou interação com a fonte e a dose de P. Na presença da fonte orgânica, o ST na dose de 90 kg ha⁻¹ de P₂O₅, elevou os teores do Pi-bic em quatro vezes em comparação com a ausência da adição da torta de filtro, com teores de 55,6 e 14 mg de P kg⁻¹ de solo, respectivamente (Figura 30 A e 30 B).

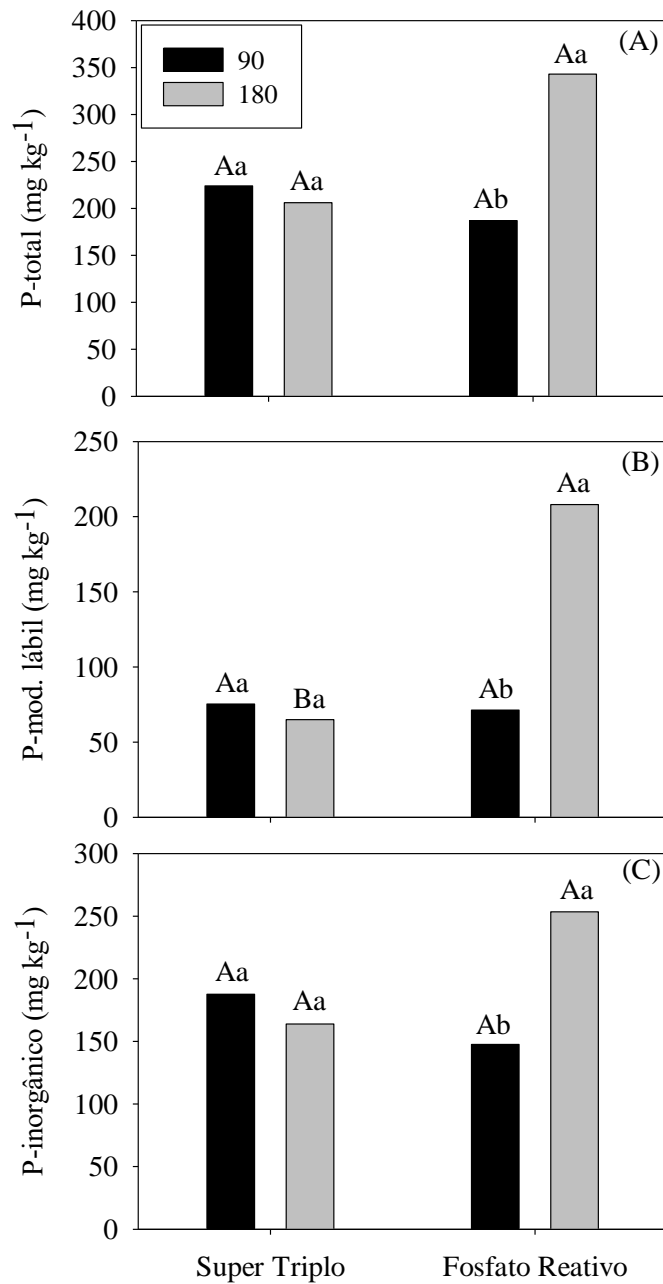


Figura 29. Desdobramento da interação dupla das frações P-total, P-moderadamente lábil e P-inorgânico do solo (20-40 cm) cultivado com cana-de-açúcar em fontes e doses de fósforo, Agudos 2014. P-total (A), P-moderadamente lábil (B) e P-inorgânico (C). Letras minúsculas compara as doses em cada fonte e maiúsculas comparam as fontes em cada dose pelo teste de Tuhey ($p < 0,05$).

O teste de Tukey (0,05) não identificou diferenças significativas para a interação dos fatores torta, fonte e dose na fração Po-hid0.1 (Figura 30 C e 30 D).

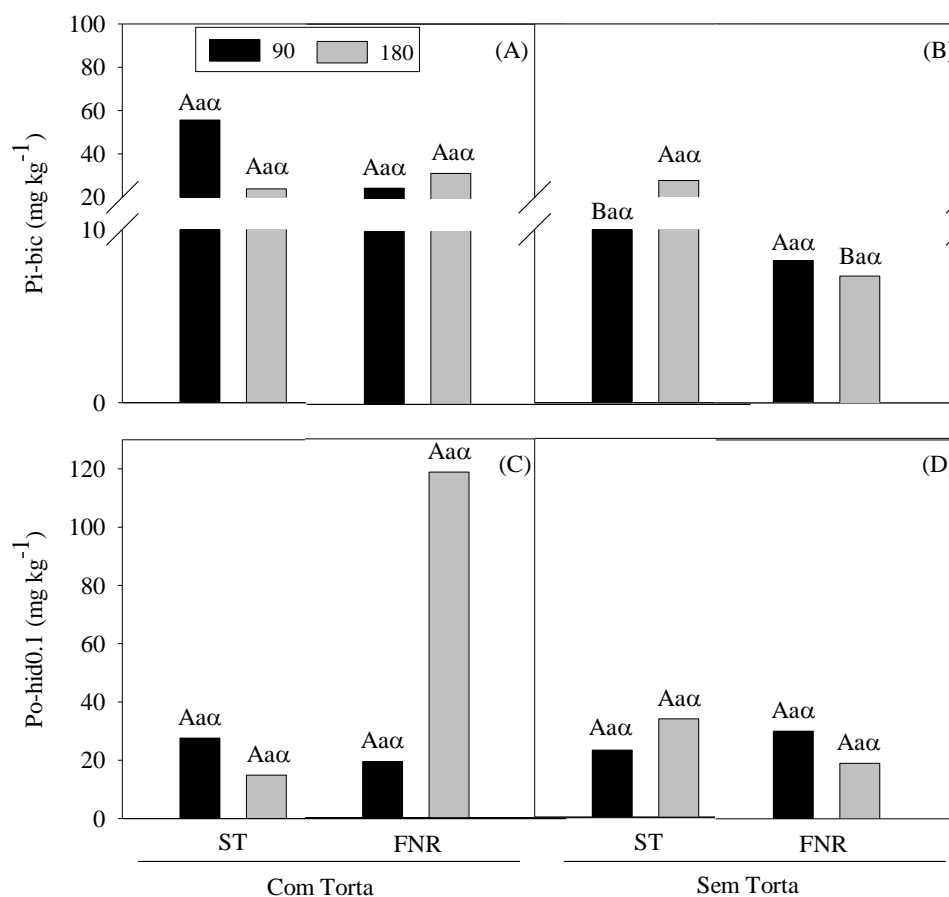


Figura 30. Desdobramento da interação tripla das frações Pi-bic e Po-hid0.1 do solo (20-40 cm) cultivado com cana-de-açúcar em fontes e doses de fósforo na presença e ausência de 10 t ha⁻¹ de torta de filtro, Agudos 2014. Pi-bic e Po-hid0.1 com torta (A e C) e Pi-bic e Po-hid0.1 sem torta (B e D), Letras gregas compara as doses em cada fonte na ausência ou presença de torta, minúsculas compararam cada dose entre fontes na presença ou ausência de torta, maiúsculas compararam cada dose da mesma fonte na ausência e presença de torta pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

B) Experimento de Agudos (Ano agrícola 2015)

Os resultados da análise de variância, contrastes e médias das frações de P do solo (0-20 cm) no ciclo de cana soca em Agudos, colhida em agosto de 2015, são apresentados na tabela 21. Observa-se que houve efeito isolado da fonte para a fração Pi-hid0.1, P-total, P-moderadamente lábil, P-não lábil e P-inorgânico. O ST foi mais efetivo que o FNR no aumento dos teores da fração Pi-hid0.1, com teores de 30,1 mg kg⁻¹ no ST contra 16,8 mg kg⁻¹ do FNR (Tabela 21). A fonte reativa (FNR) promoveu o aumento das demais formas ou compartimentos de P do solo em comparação com a fonte solúvel (ST). Essa diferença está relacionada com o aumento da fração P-HCl, que foi cerca de 14 vezes maior para o FNR que para o ST (Tabela 21).

A dose influenciou de forma isolada apenas o P-orgânico do solo. Essa forma de P aumentou da menor para a maior dose de P aplicada ao solo, saindo de 78,6 mg kg⁻¹ na dose de 90, atingindo 100,7 mg de P kg⁻¹ na dose de 180 kg ha⁻¹ de P₂O₅ (Tabela 21).

Tabela 21. Médias de frações de fósforo (mg kg⁻¹), teste F e contraste de amostras de solo da camada 0-20 cm cultivado com cana-de-açúcar em fontes e doses de fósforo associadas com torta de filtro, Agudos-SP, 2015.

Tratamento	P-res	Pi-bic	Po-bic	Pi-hid 0.1	Po-hid 0.1	P-HCl	Pi-hid 0.5	Po-hid 0.5	P-resid	P total	P-lábil	P Mod lábil	P-Não lábil	P inorg	P org	
mg kg ⁻¹																
Controle (C)	1.1	4.5	7.4	12.4	47.6	10.9	17.5	6.3	95	203	13,0	70,9	119,2	141,7	61,3	
Controle torta	1.7	6.0	5.5	18.2	50.2	9.7	16.5	8.2	88	204	13,1	78,0	113,1	140,3	63,9	
Torta (T)	Com	7.4	12.7	8.2	25.9	74.3	110.3	20.4	15.2	88	362	28,3	210,5	123,2	264,3	97,6
	Sem	6.1	8.6	14.4	21.0	46.8	64.8	21.2	18.9	89	289	30,3	133,0	129,1	210,6	81,7
Fonte (F)	ST	6.4	14.8	12.0	30.1a	45.6	11.9	18.0	18.2	84	239b	35	87,9b	119,8b	165,0b	77,2
	FNR	7.1	6.4	10.6	16.8b	75.5	163.3	23.6	16.0	93	412a	24	255,6a	132,5a	309,9a	102,1
Dose (D)	90	5.4	8.7	9.2	21.1	55.8	64.5	19.7	12.3	91	286	24	142	122,9	210,4	78,6b
	180	8.2	12.5	13.4	25.8	65.4	110.6	21.9	21.9	86	365	34	202	129,4	264,5	100,7a
Efeito	Teste F															
T	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	
F	ns	*	ns	*	ns	**	**	ns	*	**	ns	**	*	*	ns	
D	**	ns	ns	ns	ns	**	*	*	***	*	**	ns	ns	ns	*	
TxF	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	
TxD	***	**	ns	*	ns	<***	<***	*	**	***	**	**	**	***	ns	
FxD	ns	*	ns	ns	ns	*	ns	ns	<***	ns	ns	ns	ns	ns	ns	
TxFxD	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	
CV%	14	12	25	9	8	21	8	20	3	14	7	24	8	29	5	
Contrastes																
C vs C Torta	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	
C vs Trat	<***	**	ns	**	ns	*	**	**	**	***	<***	**	ns	**	ns	
C vs Trat Com	<***	***	ns	**	ns	ns	*	*	**	***	***	**	ns	**	ns	
C vs Trat Sem	<***	*	*	**	ns	**	**	**	*	**	<***	*	ns	**	ns	
C vs ST	<***	<***	ns	***	ns	ns	ns	**	***	ns	<***	ns	ns	ns	ns	
C vs FNR	<***	ns	ns	ns	ns	<***	<***	*	ns	<***	**	<***	*	***	ns	
C vs dose 90	<***	**	ns	**	ns	ns	ns	ns	ns	**	**	**	ns	**	ns	
C vs dose 180	<***	**	*	**	ns	**	**	**	**	<***	<***	**	ns	**	*	

ST = superfosfato triplo, FNR = fosfato natural reativo, CV% = coeficiente de variação, Trat = tratamento. Frações P-res = P extraído pela resina, Pi-bic e Po-bic = P inorgânico e orgânico extraídos pelo NaHCO₃, Pi-hid 0.1 e Po-hid 0.1 = P inorgânico e orgânico extraído pelo NaOH 0,1, P-HCl = P extraído pelo HCl, Pi-hid 0.5 e Po-hid 0.5 = P inorgânico e orgânico extraído pelo NaOH 0,5, P-resid = P residual. P total = soma de todas as frações; P lábil = P-res + Pi-bic + Po-bic; P Moderadamente lábil = Pi-hid 0.1 + Po-hid 0.1 + P-HCl; P-Não lábil = Pi-hid 0.5 + Po-hid 0.5 + P-resid. P inorgânico = P-res + Pi-bic + Pi-hid 0.1 + P-HCl + Pi-hid 0.5 + P-resid. P orgânico = Po-bic + Po-hid 0.1 + Po-hid 0.5. ***, * e ns significativo a 0,1, 1% e não significativo, respectivamente.

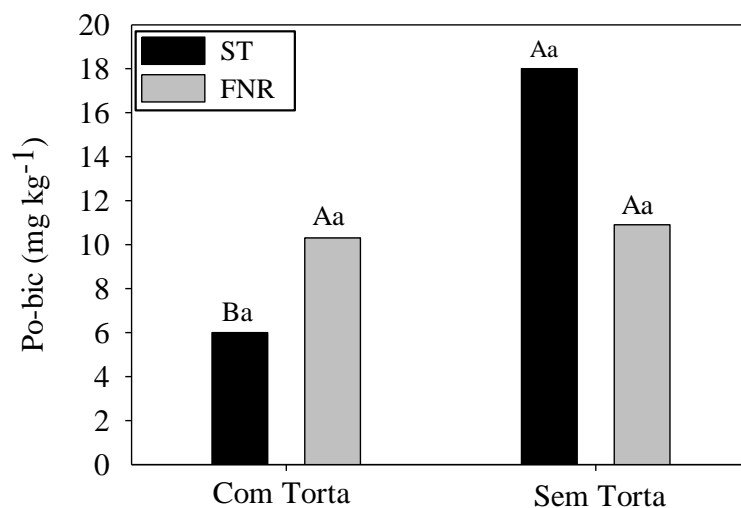


Figura 31. Desdobramento da interação dupla da fração Po-bic do solo (0-20 cm) cultivado com cana-de-açúcar em fontes de fósforo na presença e ausência de 10 t ha⁻¹ de torta de filtro, Agudos 2015. Letras minúsculas compara as fontes na presença ou ausência de torta e maiúsculas compararam cada fonte na presença e ausência de torta pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

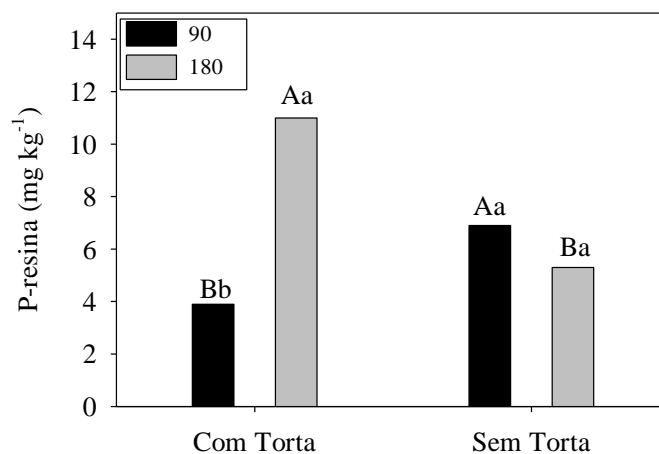


Figura 32. Desdobramento da interação dupla da fração P-resina do solo (0-20 cm) cultivado com cana-de-açúcar em doses de fósforo na presença e ausência de 10 t ha⁻¹ de torta de filtro, Agudos 2015. Letras minúsculas compara as doses na presença ou na ausência de torta de filtro e maiúsculas compararam cada dose na presença e na ausência de torta pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

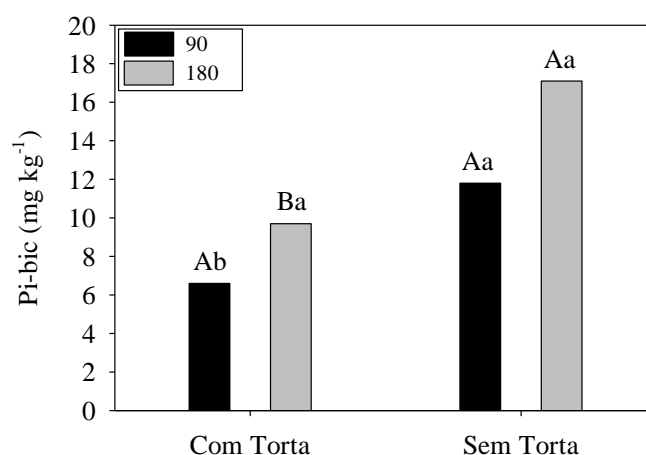


Figura 33. Desdobramento da interação dupla da fração Pi-bic do solo (0-20 cm) cultivado com cana-de-açúcar em doses de fósforo na presença e ausência de 10 t ha⁻¹ de torta de filtro, Agudos 2015. Letras minúsculas compara as doses na presença ou na ausência de torta de filtro e maiúsculas compararam cada dose na presença e na ausência de torta pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Ocorreu interação dupla entre os fatores torta de filtro x fonte, torta de filtro x dose, fonte x dose e interação tripla torta x fonte x dose na camada de 0-20 cm (Tabela 21). A interação torta x fonte foi observada somente para a fração Po-bic. Não houve diferença entre as fontes na presença ou na ausência de torta de filtro. A fonte solúvel (ST) elevou os teores dessa fração de 6 mg kg^{-1} , na presença de 10 t ha^{-1} de torta de filtro para 18 mg kg^{-1} de P kg^{-1} de solo na ausência da fonte orgânica, um incremento três vezes maior (Figura 31). A fonte reativa (FNR) não alterou essa fração, independentemente da adição ou não de torta de filtro (Figura 31).

Houve interação torta x dose para frações lábeis, moderadamente lábeis, P-total e formas inorgânicas de P (Tabela 21). As frações P-resina e Pi-bic aumentaram com o aumento da dose de P aplicada apenas quando foram associadas a torta de filtro (Figuras 32 e 33). Na ausência de torta de filtro essas duas frações não foram influenciadas pelas doses. Fixando-se a dose e comparando-a na presença e ausência de torta observou-se que a fração P-resina foi maior na dose de 90 kg ha^{-1} de P_2O_5 na ausência de torta, ocorrendo o inverso para a dose de 180 kg ha^{-1} de P_2O_5 , ou seja, esta elevou os teores da fração P-resina quando na presença da torta de filtro. A fração Pi-bic aumentou somente para a dose de 180 kg ha^{-1} de P_2O_5 quando esta foi distribuída sem torta de filtro (Figura 33).

A fração Pi-hid0.1 aumentou na dose de 180 na presença de torta de filtro em comparação com a mesma dose na ausência da torta (Figura 34 A). O P-HCl aumentou de 24 mg kg^{-1} , na dose de 90, para $196,6 \text{ mg kg}^{-1}$ na dose de 180 kg ha^{-1} de P_2O_5 na presença de torta, mas não apresentou diferença entre as doses na ausência do composto orgânico. A dose de 90 elevou os teores dessa fração quando aplicada na ausência de torta (Figura 34 B).

Na presença de torta, a fração Po-hid0.5 aumentou com a elevação da dose de P aplicada, mas isso não ocorreu quando a torta esteve ausente. A dose de 90, sem aplicação de torta, elevou os teores dessa fração para 17 mg kg^{-1} em relação aos $7,7 \text{ mg kg}^{-1}$ na presença da fonte orgânica (Figura 35 A).

As duas doses de P aplicadas não afetaram a fração P-residual na presença de torta e esta diminuiu com a elevação da dose na ausência da torta. A dose de 90 kg ha^{-1} de P_2O_5 aumentou o P-residual na ausência de torta em relação a associação com a torta (Figura 35 B). O P-residual da extração sequencial ou fracionamento contém uma resistente mistura de Pi ocluso, coberto com óxidos de Fe e Al, Pi-Ca e formas orgânicas complexas de alta energia (TIESSSEN; STEWART; COLE, 1984).

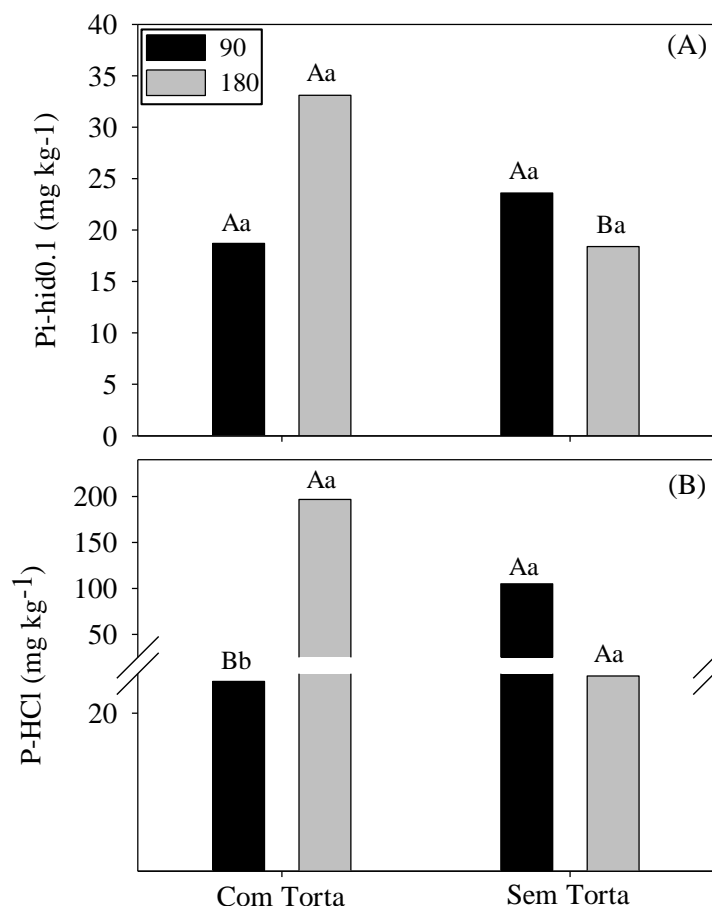


Figura 34. Desdobramento da interação dupla das frações Pi-hid0.1 e P-HCl do solo (0-20 cm) cultivado com cana-de-açúcar em doses de fósforo na presença e ausência de 10 t ha⁻¹ de torta de filtro, Agudos 2015. Pi-hid0.1 (A) e P-HCl (B). Letras minúsculas compara as doses na presença ou na ausência de torta de filtro e maiúsculas comparam cada dose na presença e na ausência de torta pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

O P-lábil aumentou da dose 90 para a dose 180 kg ha⁻¹ de P₂O₅ nos tratamentos com torta e foi indiferente nos tratamentos sem torta. A menor dose aumentou os teores de P-lábil de 18,3 na presença para 30,5 mg kg⁻¹ na ausência de torta de filtro (Figura 36 A).

Na presença da torta de filtro, o P-moderadamente lábil aumentou com a elevação da taxa de P aplicada e não foi alterado pelas doses na ausência da fonte orgânica. No comparativo da mesma dose, na presença e ausência de torta, observou-se que a dose de 180 elevou os teores do P-moderadamente lábil para 306 mg kg⁻¹ em associação com torta, sendo 97,5 mg kg⁻¹ sem a adição da torta (Figura 36 B).

P-não lábil e o P-total aumentaram com a elevação da taxa de P aplicada na presença da torta de filtro e não foram alterados pelas doses na ausência da fonte orgânica. Enquanto os teores de P-total são incrementados pela dose de 180 associada com o resíduo orgânico, o P-não lábil aumentou na dose 90 sem adição do fertilizante orgânico (Figura 37 A e 37 B).

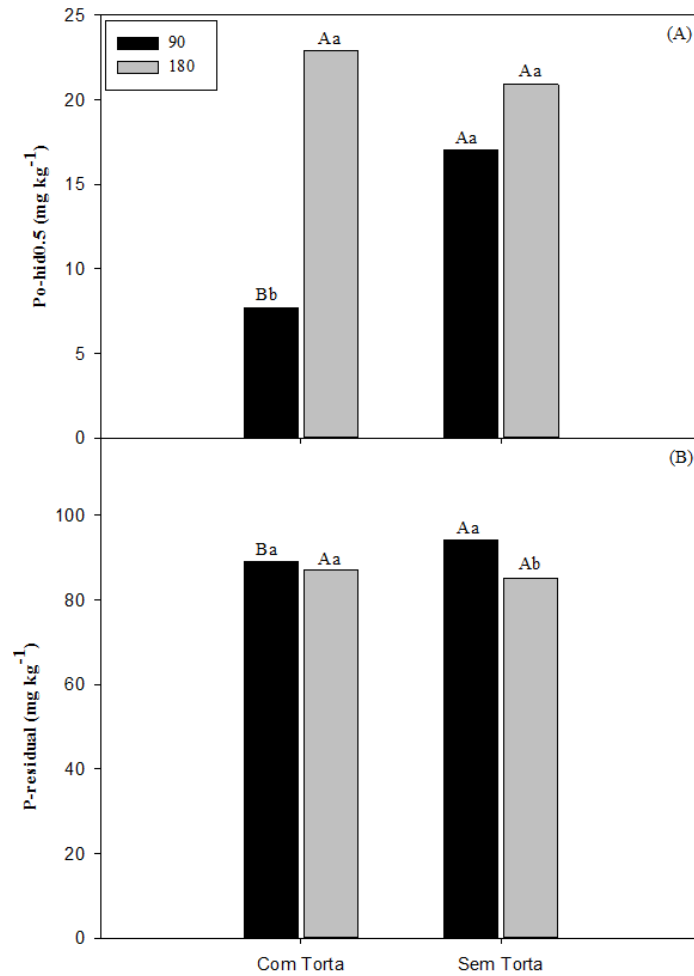


Figura 35. Desdobramento da interação dupla das frações Po-hid0.5 e P-residual do solo (0-20 cm) cultivado com cana-de-açúcar em doses de fósforo na presença e ausência de 10 t ha⁻¹ de torta de filtro, Agudos 2015. Po-hid0.5 (A) e P-residual (B). Letras minúsculas compara as doses na presença ou na ausência de torta de filtro e maiúsculas comparam cada dose na presença e na ausência de torta pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

A forma de P-inorgânica cresce e diminui seus teores com a elevação da taxa de P aplicada na presença e ausência de torta de filtro, respectivamente. A dose de 90 kg ha⁻¹ de P₂O₅ elevou os teores de P-inorgânico quando foi aplicada isoladamente, enquanto para a dose de 180 kg ha⁻¹ de P₂O₅ a elevação ocorreu quando esta foi associada com 10 t ha⁻¹ de torta de filtro (Figura 38).

A interação fonte x dose de P ocorreu para as frações Pi-bic, P-HCl e P-residual. Os teores de Pi-bic aumentaram de 10,5 mg kg⁻¹ na dose de 90 para 19,1 mg kg⁻¹ na dose de 180 kg ha⁻¹ de P₂O₅ para o ST. Para esta mesma fração de P, o FNR foi indiferente às doses. A dose de 180 na forma de ST aumentou os teores de Pi-bic em mais de três vezes em comparação a mesma taxa na forma de FNR (Figura 39 A). A fração P-HCl foi alterada pelo ST somente na dose de 180 kg ha⁻¹ de P₂O₅. Para o FNR não houve efeito das doses, mas os valores são bastante superiores aos do ST para as duas doses de P testadas (Figura 39 B).

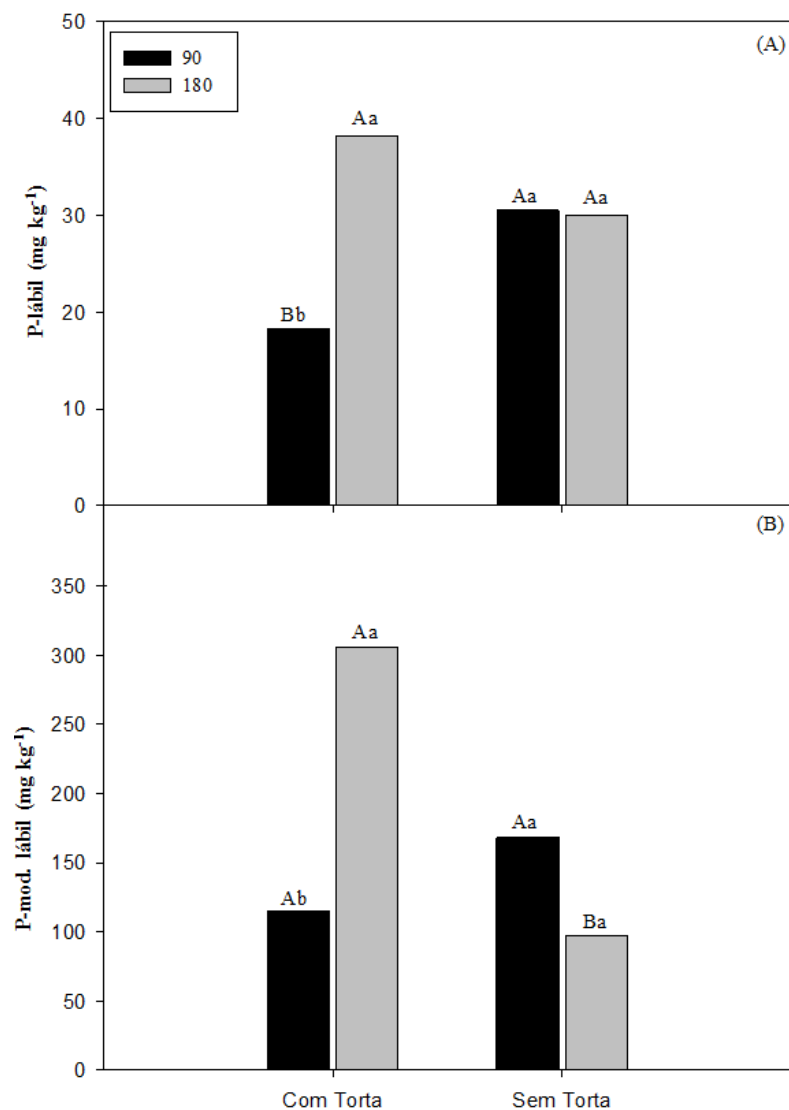


Figura 36. Desdobramento da interação dupla da frações P-lábil e P-moderadamente lábil do solo (0-20 cm) cultivado com cana-de-açúcar em doses de fósforo na presença e ausência de 10 t ha⁻¹ de torta de filtro, Agudos 2015. P-lábil (A) e P-moderadamente lábil (B). Letras minúsculas compara as doses na presença ou na ausência de torta de filtro e maiúsculas comparam cada dose na presença e na ausência de torta pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

O P-residual diminuiu com o aumento da dose para o ST e se manteve estável para o FNR, o qual elevou essa fração de P-não lábil na dose de 180 kg ha⁻¹ de P₂O₅ na comparação com a fonte ST (Figura 40).

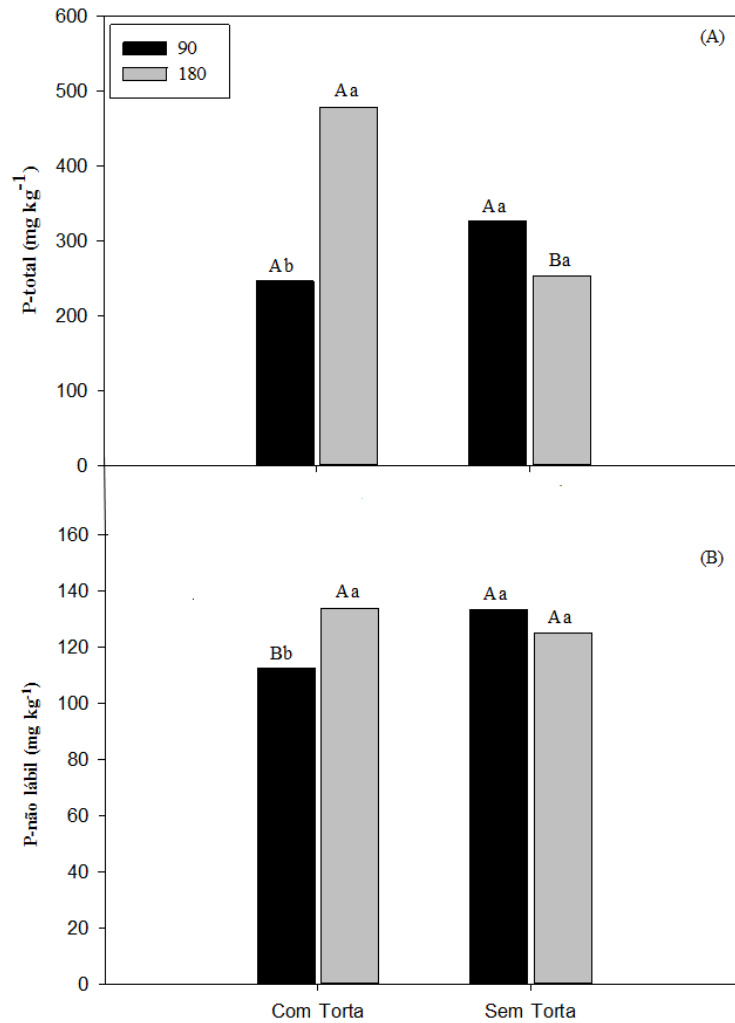


Figura 37. Desdobramento da interação dupla do P-total e P-não lábil do solo (0-20 cm) cultivado com cana-de-açúcar em doses de fósforo na presença e ausência de 10 t ha⁻¹ de torta de filtro, Agudos 2015. P-total (A) e P-não lábil (B). Letras minúsculas compara as doses na presença ou na ausência de torta de filtro e maiúsculas comparam cada dose na presença e na ausência de torta pelo teste de Tuhey ($p < 0,05$).

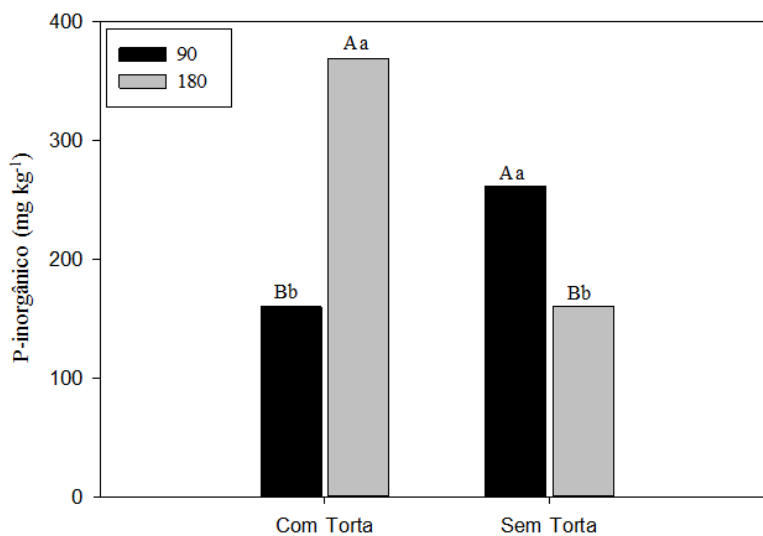


Figura 38. Desdobramento da interação dupla do P-inorgânico do solo (0-20 cm) cultivado com cana-de-açúcar em doses de fósforo na presença e ausência de 10 t ha⁻¹ de torta de filtro, Agudos 2015. Letras minúsculas compara as doses na presença ou na ausência de torta de filtro e maiúsculas comparam cada dose na presença e na ausência de torta pelo teste de Tuhey ($p < 0,05$).

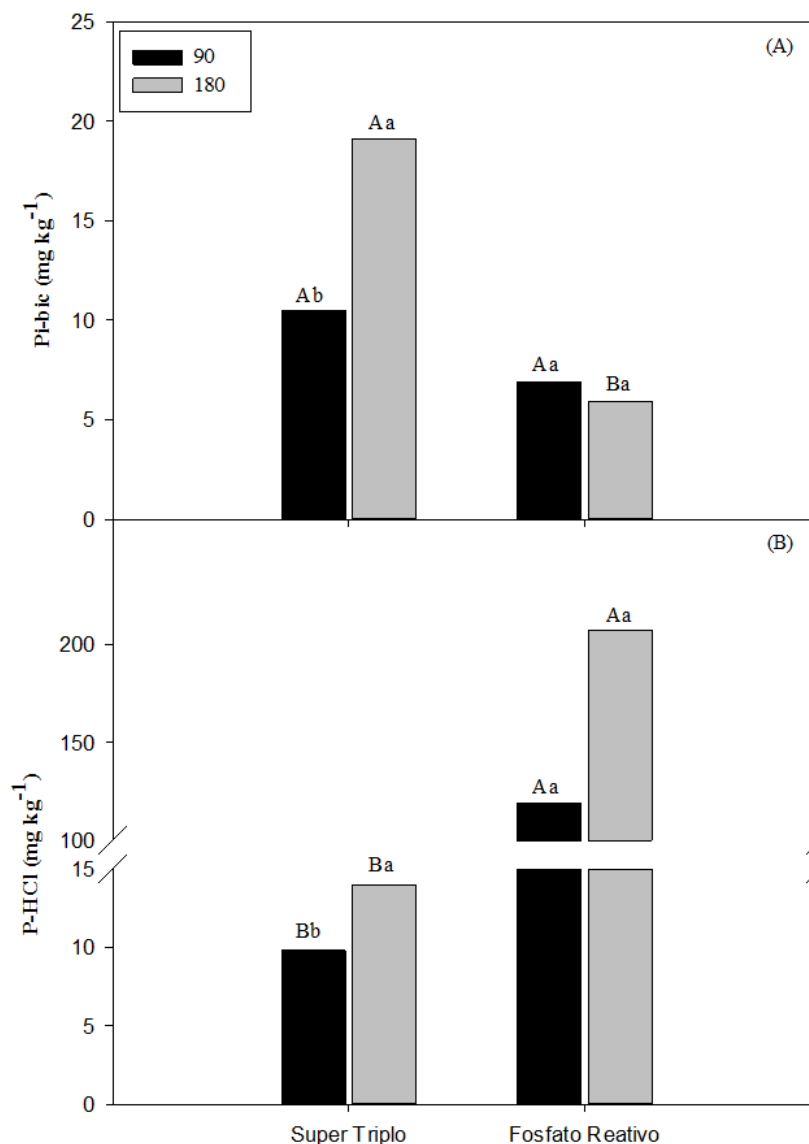


Figura 39. Desdobramento da interação dupla das frações Pi-bic e P-HCl do solo (0-20 cm) cultivado com cana-de-açúcar em fontes e doses de fósforo, Agudos 2015. Pi-bic (A) e P-HCl (B). Letras minúsculas compara as doses em cada fonte de P e maiúsculas comparam cada dose nas duas fontes pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

A fração Pi-hid0.5 apresentou interação tripla entre torta x fonte x dose. Na presença de torta, as doses não influenciaram essa fração para a fonte ST, mas para o FNR a dose de 180 elevou os teores em comparação com a dose de 90 kg ha⁻¹ de P₂O₅ (Figura 41). Na ausência de torta de filtro não houve diferença entre as doses para ambas as fontes. A comparação de cada dose entre as fontes, na presença ou ausência de torta, mostrou que na dose de 180 kg ha⁻¹ de P₂O₅ a fonte reativa apresentou maiores teores de Pi-hid0.5 que a fonte solúvel na presença de torta. O mesmo comportamento foi observado para a dose de 90 kg ha⁻¹ de P₂O₅ na ausência do resíduo orgânico.

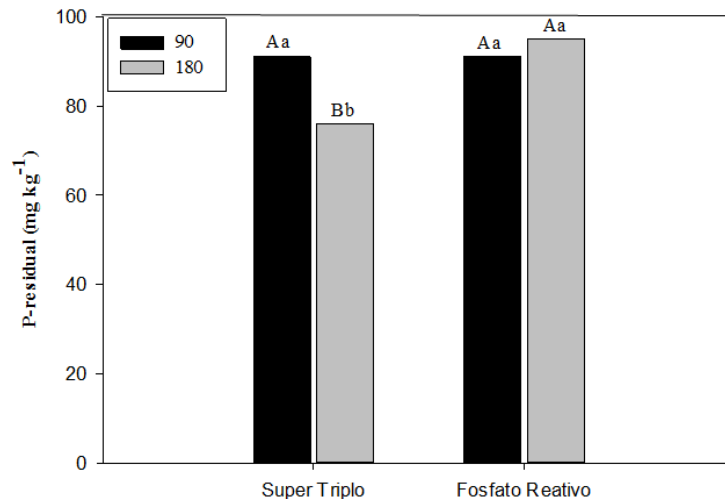


Figura 40. Desdobramento da interação dupla do P-residual do solo (0-20 cm) cultivado com cana-de-açúcar em fontes e doses de fósforo, Agudos 2015. Pi-bic. Letras minúsculas compara as doses em cada fonte de P e maiúsculas comparam cada dose nas duas fontes pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

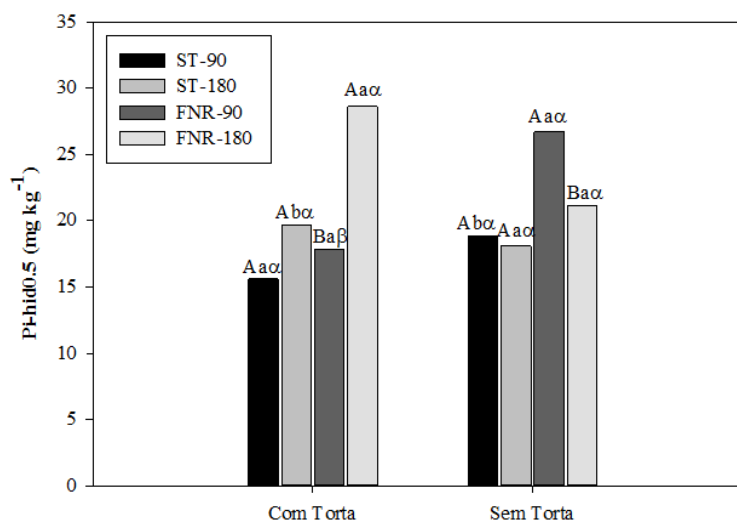


Figura 41. Desdobramento da interação tripla da fração Pi-bic do solo (0-20 cm) cultivado com cana-de-açúcar em fontes e doses de fósforo na presença e ausência de 10 t ha⁻¹ de torta de filtro, Agudos 2015. Letra grega compara as doses em cada fonte na ausência ou presença de torta, minúsculas compara cada dose entre fontes na presença ou ausência de torta, maiúsculas compara cada dose da mesma fonte na ausência e presença de torta pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

A interação do fator torta x dose foi observada apenas para a fonte reativa. Essa fonte elevou os teores da fração Pi-hid0.5 na dose de 90 sem torta em relação a presença de torta. Para a dose de 180 kg ha⁻¹ de P₂O₅ ocorreu o inverso, ou seja, os teores dessa fração de P foram maiores quando o FNR foi associado com a torta de filtro (Figura 41).

Não houve efeito isolado da aplicação de 10 t ha⁻¹ de torta de filtro nas frações de P do solo da camada 20-40 cm dois anos após a sua aplicação (Tabela 22). As frações P-resina, Pi-bic, Pi-hid0.1, P-lábil e o P-não lábil foram influenciadas pela fonte de forma isolada. O ST foi mais efetivo do que o FNR em aumentar essas frações e compartimentos de P.

Tabela 22. Médias de frações de fósforo (mg kg^{-1}), teste F e contraste de amostras de solo da camada 20-40 cm cultivado com cana-de-açúcar em fontes e doses de fósforo associadas com torta de filtro, Agudos-SP, 2015.

Tratamento	P-res	Pi-bic	Po-bic	Pi-hid 0.1	Po-hid 0.1	P-HCl	Pi-hid 0.5	Po-hid 0.5	P-resid	P total	P-lábil	P Mod lábil	P-Não lábil	P inorg	P org	
----- mg kg^{-1} -----																
Controle (C)	3,3	2,4	16,6	19,2	40,2	12,0	21,0	46,0	62	223	22,3	71,3	128,7	120,0	102,7	
Controle torta	4,4	2,5	26,6	41,9	45,4	26,5	23,9	39,3	54	262	31,0	114,0	117,0	150,7	111,3	
Torta (T)	Com	23,8	11,0	30,7	45,8	51,7	38,1	28,7	33,3	74	337	65,4	135,6	135,8	221,1	115,8
	Sem	15,3	5,2	20,3	28,6	63,7	54,9	29,7	38,1	69	325	40,8	147,2	136,7	202,4	122,3
Fonte (F)	ST	24,5a	11,3a	29,0	48,1a	47,1	7,0	28,3	34,3	78	308	64,8a	102,2	140,8a	197,4	110,5
	FNR	14,6b	4,8b	22,0	26,3b	68,2	85,9	30,1	37,1	64	353	41,4b	180,6	131,6b	226,1	127,5
Dose (D)	90	15,7	6,7	23,1	32,0	42,5	48,7	29,5	34,6	69	302	45,3	123,2	133,4	201,8	100,3
	180	23,4	9,5	27,9	42,5	72,9	44,2	28,9	36,8	73	359	60,8	159,6	139,0	221,7	137,8
Efeito	Teste F															
T	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	
F	**	**	*	**	ns	*	ns	ns	**	ns	***	*	*	ns	ns	
D	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**	ns	**	ns	ns	ns	
TxF	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	
TxD	*	ns	ns	ns	ns	**	ns	ns	ns	*	ns	*	ns	**	ns	
FxD	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**	*	*	ns	ns	ns	ns	*	ns	
TxFxD	ns	ns	ns	ns	ns	**	ns	ns	ns	*	ns	**	ns	*	ns	
CV%	10	31	34	22	16	9	12	24	7	2	9	4	7	12	8	
Contrastes																
C vs C Torta	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	
C vs Trat	<***	<***	ns	*	ns	ns	*	ns	**	*	**	**	ns	**	ns	
C vs Trat Com	<***	<***	*	**	ns	ns	*	*	**	*	***	*	ns	**	ns	
C vs Trat Sem	<***	**	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns	*	*	**	ns	**	ns	
C vs ST	<***	<***	*	**	ns	ns	*	ns	***	*	***	ns	ns	**	ns	
C vs FNR	<***	**	ns	ns	ns	*	*	ns	ns	**	*	**	ns	**	ns	
C vs dose 90	<***	***	ns	*	ns	ns	*	ns	*	ns	**	ns	ns	*	ns	
C vs dose 180	<***	<***	ns	**	ns	ns	*	ns	**	**	***	**	ns	**	ns	

ST = superfosfato triplo, FNR = fosfato natural reativo, CV% = coeficiente de variação, Trat = tratamento. Frações P-res = P extraído pela resina, Pi-bic e Po-bic = P inorgânico e orgânico extraídos pelo NaHCO_3 , Pi-hid 0.1 e Po-hid 0.1 = P inorgânico e orgânico extraído pelo NaOH 0,1, P-HCl = P extraído pelo HCl, Pi-hid 0.5 e Po-hid 0.5 = P inorgânico e orgânico extraído pelo NaOH 0,5, P-resid = P residual. P total = soma de todas as frações; P lábil = P-res + Pi-bic + Po-bic; P Moderadamente lábil = Pi-hid 0.1 + Po-hid 0.1 + P-HCl; P-Não lábil = Pi-hid 0.5 + Po-hid 0.5 + P-resid. P inorgânico = P-res + Pi-bic + Pi-hid 0.1 + P-HCl + Pi-hid 0.5 + P-resid. P orgânico = Po-bic + Po-hid 0.1 + Po-hid 0.5. ***, * e ns significativo a 0,1, 1% e não significativo, respectivamente.

A soma das frações P-resina e Pi-bic foram de 35,8 e 19,4 mg kg⁻¹ e isso fez com que o P-lábil atingisse 64,8 e 41,4 mg de P kg⁻¹ para as fontes solúvel e reativa, respectivamente. O P-lábil representou 21% do P-total e foi equivalente a 46% do P-não lábil para o ST, representando 12% do P-total equivalente a 31% do P-não lábil para o FNR (Tabela 22), ou seja, o P-não lábil foi duas vezes maior que o P-lábil para o ST e três vezes para o FNR.

A fração Pi-hid0.1, a qual se considera ser constituída de formas de Pi adsorvidas aos óxidos de Fe e Al (HEDLEY; STEWART; CHAUHAN, 1982) foi incrementada em cerca de duas vezes pelo ST em relação ao FNR, com teores de 48,1 e 26,3 mg de P kg⁻¹ de solo, respectivamente (Tabela 22). Essa fração é considerada moderadamente lábil e está em equilíbrio com o P-lábil, sendo o principal reservatório responsável pela reposição do P-lábil do solo (GOH; CONDRON, 1989; CROSS; SCHLESINGER, 1995).

Na comparação por meio de contrastes, observou-se que o controle com torta foi mais eficiente do que o controle sem torta em aumentar os teores apenas da fração Pi-hid0.1. Os contrastes demonstraram que a adição de fertilizantes ao solo elevou os teores de P-inorgânico, particularmente das frações lábeis P-resina e Pi-bic e da fração moderadamente lábil Pi-hid0.1 (Tabela 22). A fração Pi-hid0.1 foi mais influenciada pela associação das fontes orgânicas e inorgânicas, pela fonte solúvel e pelo aumento da taxa de aplicação de P ao solo. O P-orgânico total do solo e o P-não lábil não foram alterados na camada de 20-40 cm pela adição fertilizantes aos dois anos após a sua aplicação.

Foi observado interação torta x fonte para as frações orgânicas Po-bic e Po-hid0.5. As fontes não alteraram a fração Po-bic na presença da torta. Na ausência da torta, o ST foi mais efetivo que o FNR na elevação dos teores dessa fração (Figura 42 A).

A comparação do ST na presença e ausência de torta mostrou que o mesmo não alterou a fração Po-bic. O FNR alterou essa fração na presença de torta em comparação com a ausência (Figura 42 A). Não se verificou efeito significativo da interação torta x fonte para a fração Po-hid0.5 (Figura 42 B).

A interação torta x dose de P mostrou que a fração lábil P-resina teve seus teores elevado com o aumento da dose na associação com a torta de filtro. Esse comportamento não foi observado na ausência do fertilizante orgânico. Na dose de 180 kg ha⁻¹ de P₂O₅, o P-resina foi elevado em duas vezes na presença de torta em comparação com a ausência (Figura 43).

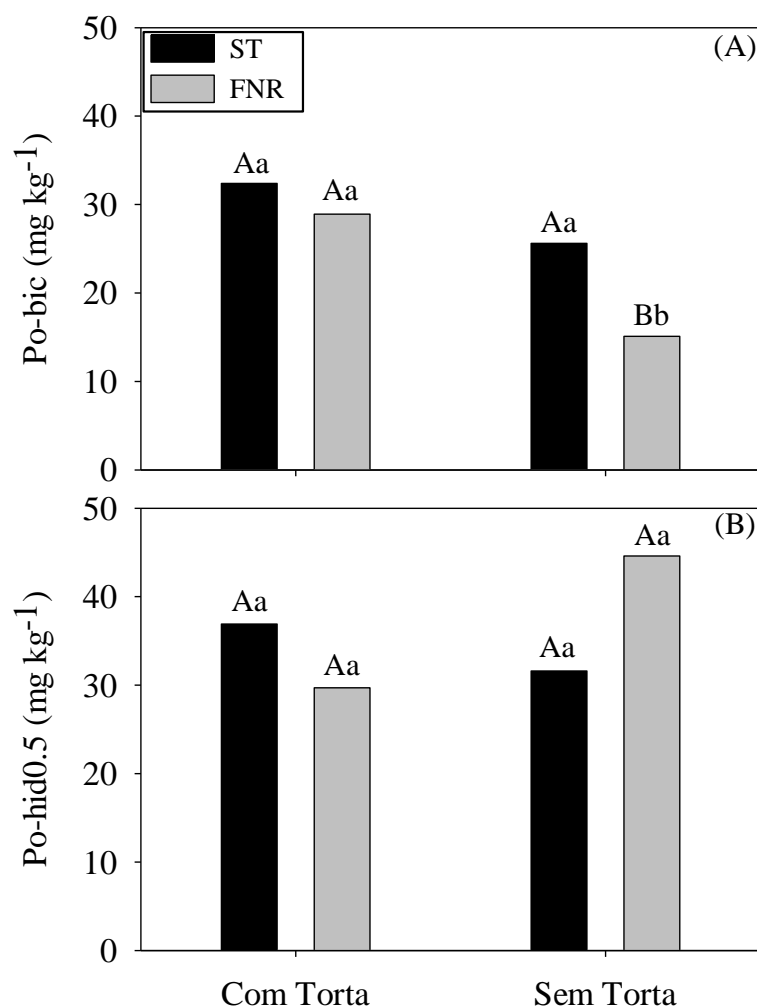


Figura 42. Desdobramento da interação dupla das frações Po-bic e Po-hid0.5 do solo (20-40 cm) cultivado com cana-de-açúcar em fontes de fósforo na presença e ausência de 10 t ha⁻¹ de torta de filtro, Agudos, 2015. Po-bic (A) e Po-hid0.5 (B). Letras minúsculas compara as fontes na presença ou ausência de torta e maiúsculas comparam cada fonte na presença e ausência de torta pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Houve interação fonte e dose de P para as frações Pi-hid0.5, Po-hid0.5 e P-residual (Tabela 22). A fração Pi-hid0.5 não foi alterada com o aumento da dose quando foi fornecida na forma de ST (Figura 44 A). Quando a quantidade de P recomendada foi fornecida via FNR, observou-se que a dose de 90 kg ha⁻¹ de P₂O₅ conseguiu elevar os teores dessa fração em relação a dose de 180 kg ha⁻¹ de P₂O₅. Nessa mesma dose, a fonte reativa foi superior à fonte solúvel em aumentar a fração não lábil de P (Figura 44 A). O efeito da interação significativa entre fonte x dose de P, mostrada pelo teste F, na análise de variância para a fração Po-hid0.5 (Tabela 22) não foi confirmada pela comparação de médias feita pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$) (Figura 44 B).

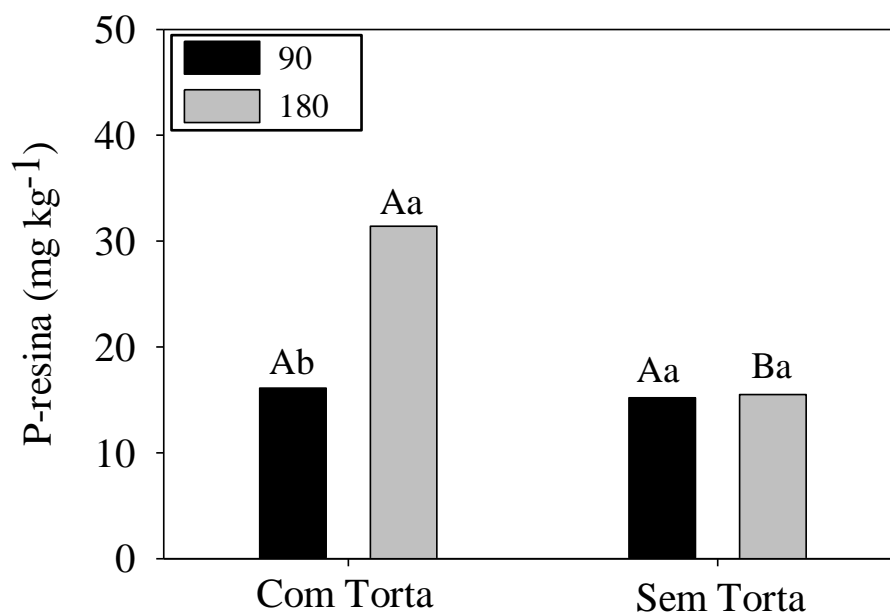


Figura 43. Desdobramento da interação dupla da fração P-resina do solo (20-40 cm) cultivado com cana-de-açúcar em doses de fósforo na presença e ausência de 10 t ha⁻¹ de torta de filtro, Agudos 2015. Letras minúsculas compara as doses na presença ou na ausência de torta de filtro e maiúsculas comparam cada dose na presença e na ausência de torta pelo teste de Tuhey ($p < 0,05$).

As duas doses de P testadas não alteraram o P-residual do solo (Figura 45). No comparativo das fontes em cada dose registrou-se um aumento no P-residual de 60 mg kg⁻¹ na fonte reativa para 79 mg de P kg⁻¹ quando a dose de 90 kg ha⁻¹ de P₂O₅ foi fornecida na forma de ST (Figura 45), com incremento superior a 30%.

Houve interação tripla entre torta x fonte x dose para a fração P-HCl, para o P-total, P-moderadamente lábil e P-inorgânico (Tabela 22). As doses de P aplicadas ao solo não alteraram a fração P-HCl quando foram fornecidas pela fonte solúvel (ST), independentemente da presença ou da ausência de torta de filtro (Figura 46 A e 46 B).

Comportamento similar foi observado para a fonte reativa (FNR) apenas na presença de torta de filtro (Figura 46 A). Para esta fonte, na ausência de torta de filtro, a dose recomendada (180 kg ha⁻¹ de P₂O₅) diminuiu o P-HCl em relação a aplicação de apenas metade desta dose (90 kg ha⁻¹ de P₂O₅), com teores de 60 e 147 mg kg⁻¹, respectivamente (Figura 46 B). A influência da dose e da torta de filtro foi observada apenas para a fonte reativa (FNR). A comparação de cada dose nas fontes FNR e ST mostra a maior capacidade da fonte reativa em aumentar a fração ácida P-HCl em associação ou não com torta de filtro (Figura 46 A e 46 B). A menor dose, na forma de FNR, foi mais efetiva no aumento da fração P-HCl na ausência de torta, superando em quatro vezes os valores obtidos com a sua aplicação junto com a fonte orgânica.

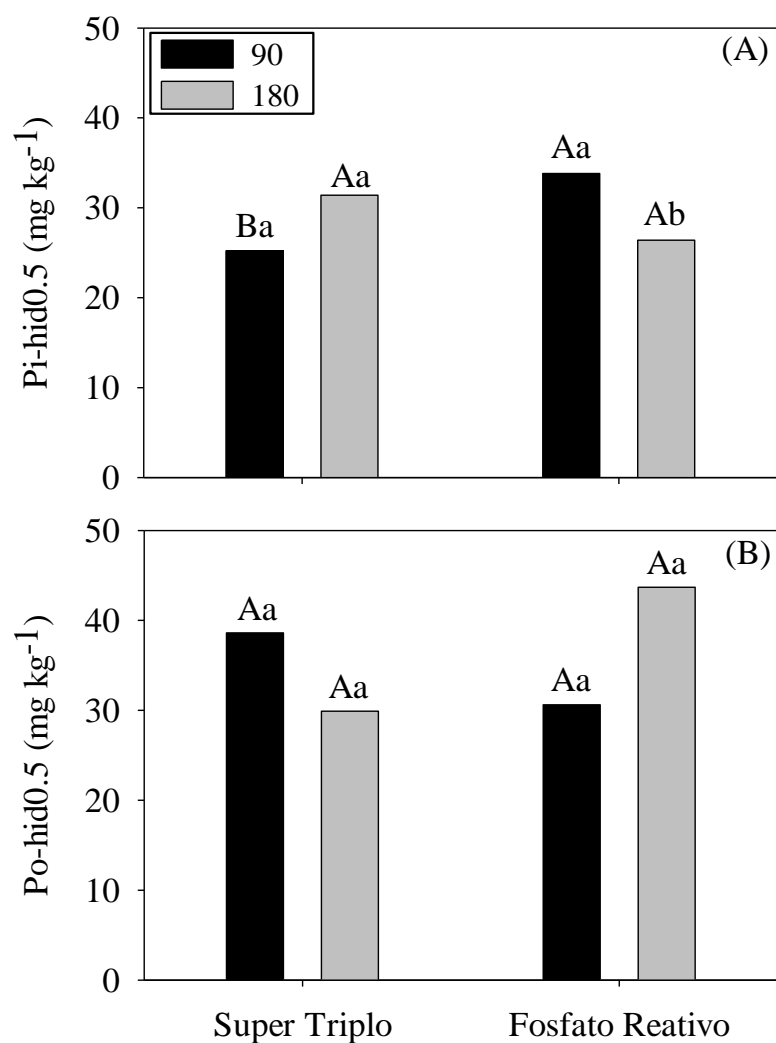


Figura 44. Desdobramento da interação dupla das frações Pi-hid0.5 e Po-hid0.5 do solo (20-40 cm) cultivado com cana-de-açúcar em fontes e doses de fósforo, Agudos, 2015. Pi-hid0.5 (A) e Po-hid0.5 (B). Letras minúsculas compara as doses em cada fonte de P e maiúsculas compararam cada dose nas duas fontes pelo teste de Tuhey ($p < 0,05$).

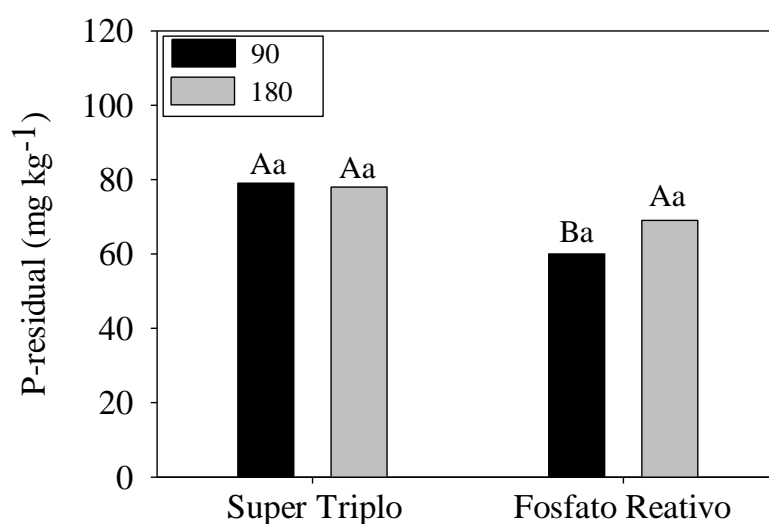


Figura 45. Desdobramento da interação dupla do P-residual do solo (20-40 cm) cultivado com cana-de-açúcar em fontes e doses de fósforo, Agudos, 2015. Letras minúsculas compara as doses em cada fonte de P e maiúsculas compararam cada dose nas duas fontes pelo teste de Tuhey ($p < 0,05$).

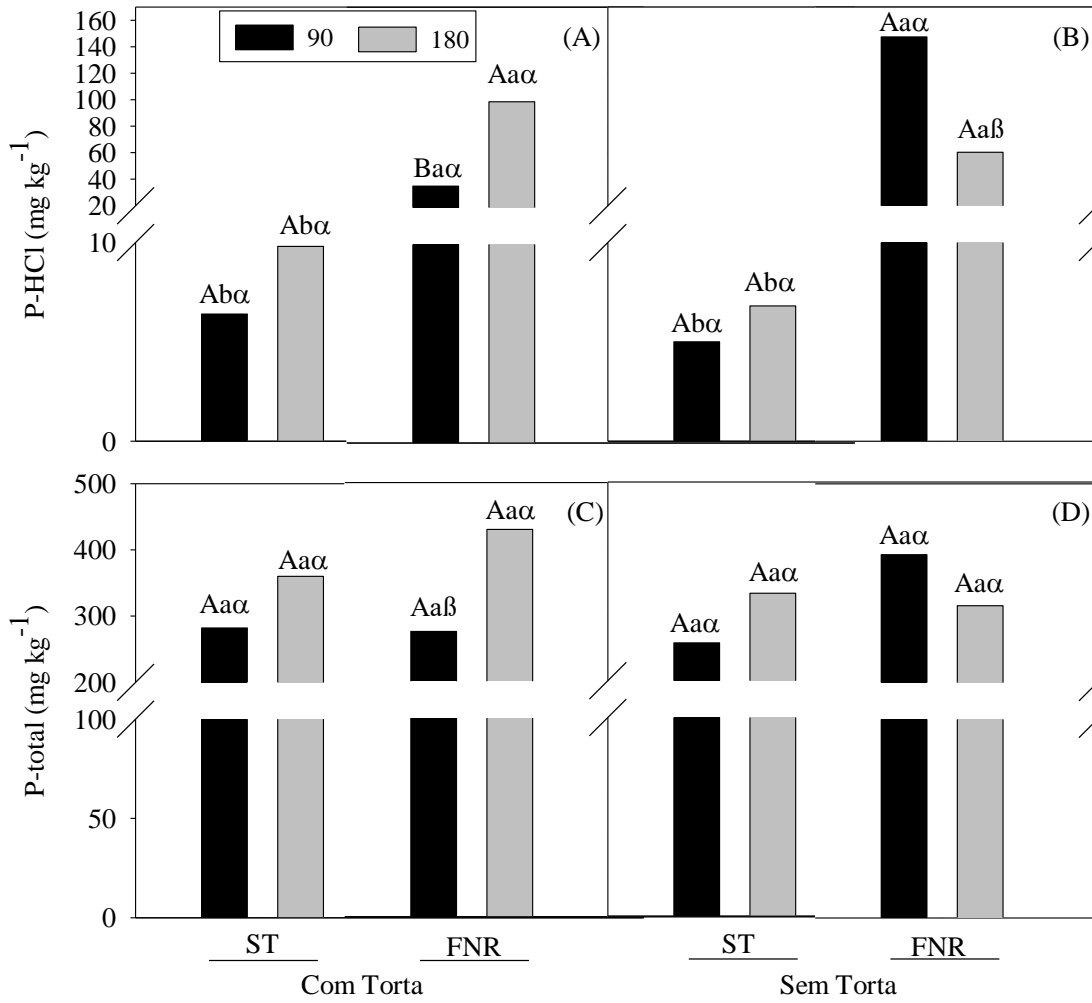


Figura 46. Desdobramento da interação tripla das frações P-HCl e do P-total do solo (20-40 cm) cultivado com cana-de-açúcar em fontes e doses de fósforo na presença e ausência de 10 t ha⁻¹ de torta de filtro, Agudos 2015. P-HCl e do P-total com torta (A e C) e P-HCl e do P-total sem torta (B e D), Letra grega compara as doses em cada fonte na ausência ou presença de torta, minúsculas compara cada dose entre fontes na presença ou ausência de torta, maiúsculas compara cada dose da mesma fonte na ausência e presença de torta pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

O P-total do solo não foi alterado pelas taxas de aplicação de P para a fonte com ou sem a aplicação de fertilizante orgânico (Figura 46 C e 46 D). Com a adição de torta de filtro, o P-total do solo foi alterado pelas taxas de P aplicadas ao solo, mas apenas para o FNR. Para esta fonte observou-se que os teores de P-total acompanharam o aumento da dose, alcançando valores 275 e 429 mg de P kg⁻¹ para a dose de 90 e 180 kg ha⁻¹ de P₂O₅, respectivamente (Figura 46 C).

O P-moderadamente lábil do solo não foi influenciado pela aplicação das doses de P na forma de ST, independentemente da associação ou não com a fonte orgânica e nem pelo FNR adicionado apenas na forma inorgânica (Figura 47 A e 47 B). Considerando-se somente a presença de torta, esse compartimento de P foi elevado de 107 para 234 mg kg⁻¹ no FNR quando a dose passou de 90 para 180 kg ha⁻¹ de P₂O₅ (Figura 47 A).

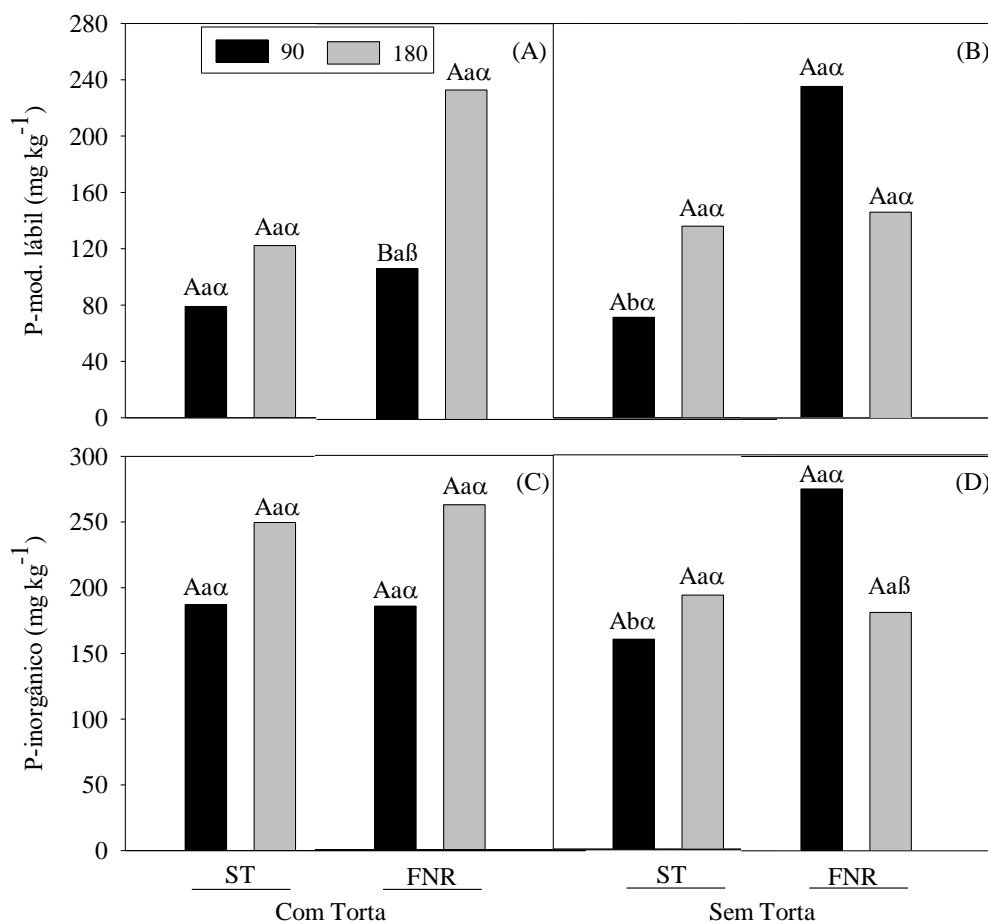


Figura 47. Desdobramento da interação tripla do P-moderadamente lábil e do P-inorgânico do solo (20-40 cm) cultivado com cana-de-açúcar em fontes e doses de fósforo na presença e ausência de 10 t ha⁻¹ de torta de filtro, Agudos 2015. P-moderadamente lábil e P-inorgânico com torta (A e C) e P-moderadamente lábil e P-inorgânico sem torta (B e D), Letra grega compara as doses em cada fonte na ausência ou presença de torta, minúsculas compara cada dose entre fontes na presença ou ausência de torta, maiúsculas compara cada dose da mesma fonte na ausência e presença de torta pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Observou-se que os teores do P-moderadamente lábil do solo aumentaram mais de três vezes pelo FNR, na dose de 90 kg ha⁻¹ de P₂O₅, em relação à fonte solúvel, considerando-se apenas a aplicação das fontes minerais, na ausência de torta de filtro (Figura 47 B). Não foi registrado efeito das fontes na presença da torta. A torta de filtro interagiu com a fonte reativa na dose de 90 kg ha⁻¹ de P₂O₅, diminuindo os teores do P-moderadamente lábil do solo de 235 na ausência para 107 mg de P kg⁻¹ na presença da fonte orgânica de P (Figura 45 A e 47 B). Esse efeito da fonte foi observado apenas quando a aplicação do P foi feita de forma isolada, com superioridade da fonte reativa em relação à solúvel. Isso é reflexo da alta quantidade de P-Ca da fração P-HCl, a qual é parte integrante do P-moderadamente lábil (Figura 46 A e 46 B).

As doses de P testadas não alteraram o P-inorgânico do solo quando estas foram adicionadas via ST, tanto na ausência quanto na presença de torta de filtro (Figura 47 C e 47

D). Esta forma de P teve seus teores aumentados em 50% pela dose de 90 em relação a dose de 180 kg ha⁻¹ de P₂O₅, na forma de FNR, sem a adição de torta (Figura 47 D). Fixando-se os fatores torta e dose, observou-se que o FNR elevou o P-inorgânico do solo de 160 mg kg⁻¹ no ST para 275 mg kg⁻¹ no FNR na dose de 90 kg ha⁻¹ de P₂O₅, sem a adição de torta de filtro (Figura 47 D), certamente impulsionado pela grande diferença existente nos teores entre as fontes para a fração P-HCl (Figura 46 A e 46 B).

C) Experimento de Macatuba (Ano agrícola 2015)

A aplicação de 10 t ha⁻¹ de torta de filtro não alterou as frações de P do solo na camada 0-20 cm um ano após a sua aplicação (Tabela 23). O fator dose apresentou efeito isolado para o P-lábil, refletindo as alterações promovidas por estas no P-resina. Os teores foram de 40 mg kg⁻¹ na dose de 90 e de 52 mg kg⁻¹ na dose de 180 kg ha⁻¹ de P₂O₅ (Tabela 23).

Os contrastes, que comparam o controle com os tratamentos fertilizados, mostram que a adição de fertilizantes orgânicos e/ou inorgânico promoveu alterações significativas nas frações inorgânicas, exceto para o Pi-hid0.1 e nas frações orgânicas de P do solo (Tabela 23). O controle com torta superou o controle sem torta somente para as frações P-resina e Pi-bic e o P-lábil, em decorrência dessas duas frações serem partes constituintes desse compartimento de P. As maiores alterações ocorreram nas frações lábeis P-resina, Pi-bic e na fração de P-moderadamente lábil P-HCl. O P-não lábil não foi alterado pela adição dos fertilizantes e nem o P-inorgânico, embora tenha havido alterações em grande parte das frações inorgânicas (P-resina, Pi-bic, P-HCl e Pi-hid0.5), que juntas com o P-residual compõem essa forma de P do solo.

Isso reflete o fato do P-residual não ter sido alterado pelos fertilizantes e por este compor mais de 70% do P-inorgânico do solo. O P-orgânico do solo foi alterado devido às alterações nas frações Po-bic, Po-hid0.1 e, em menor extensão, pela fração Po-hid0.5. O P-total do solo aumentou com a adição de fertilizantes, exceto para a menor dose (Tabela 23).

Os níveis de significância mostraram ainda que as frações P-resina e P-HCl foram altamente influenciadas pela adição de fertilizantes, com exceção da aplicação de ST para o P-HCl. Os tratamentos sem adição de torta de filtro indicam pouca ou nenhuma relação com as frações orgânicas, as quais parecem estar mais relacionadas com a fonte reativa e com o aumento da quantidade de fertilizante aplicada (Tabela 23).

Tabela 23. Médias de frações de fósforo (mg kg^{-1}), teste F e contraste de amostras de solo da camada 0-20 cm cultivado com cana-de-açúcar em fontes e doses de fósforo associadas com torta de filtro, Macatuba, 2015.

Tratamento	P-res	Pi-bic	Po-bic	Pi-hid 0.1	Po-hid 0.1	P-HCl	Pi-hid 0.5	Po-hid 0.5	P-resid	P total	P-lábil	P Mod lábil	P-Não lábil	P inorg	P org	
mg kg^{-1}																
Controle (C)	4.0	1.2	15.3	18.0	85.8	9.7	39.1	63.0	434	670	20,5	113,6	536,1	506,0	164,2	
Controle torta	17.8	5.5	21.9	28.2	96.4	14.7	43.6	57.8	448	734	45,1	139,3	549,6	557,9	176,0	
Torta (T)	Com	17.3	5.3	23.7	23.8	144.3	33.3	46.3	73.7	429	796	45,9	201,4	548,7	554,6	241,7
	Sem	20.0	4.7	21.2	22.3	128.8	38.3	46.6	76.8	410	769	45,9	189,4	533,5	542,0	226,9
Fonte (F)	ST	22.9	4.9	24.4	24.0	145.4	12.2	44.4	69.9	442	790	52,3	181,6	555,9	550,1	239,7
	FNR	14.4	5.0	20.6	22.1	127.7	59.4	48.5	80.6	397	775	39,9	209,2	526,3	546,6	228,9
Dose (D)	90	14.1	4.5	21.4	22.6	143.8	24.8	46.4	72.2	411	761	40,0b	191,3	529,9	523,7	237,5
	180	23.2	5.4	23.5	23.4	129.3	46.8	46.5	78.3	428	804	52,2a	199,5	552,3	572,9	231,1
Efeito	Teste F															
T	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	
F	*	ns	ns	ns	ns	**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	
D	**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	
TxF	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	
TxD	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns	
FxD	*	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	
TxFxD	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	
CV%	25	49	25	21	20	14	14	17	11	9	6	3	8	11	15	
Contrastes																
C vs C Torta	*	*	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	
C vs Trat	<****	**	*	ns	*	****	*	ns	ns	*	<****	****	ns	ns	**	
C vs Trat Com	<****	**	*	ns	*	****	ns	ns	ns	*	<****	****	ns	ns	**	
C vs Trat Sem	<****	*	ns	ns	ns	****	ns	ns	ns	*	<****	****	ns	ns	**	
C vs ST	<****	*	*	ns	*	ns	ns	ns	ns	*	<****	**	ns	ns	**	
C vs FNR	<****	**	ns	ns	ns	<****	*	*	ns	*	****	****	ns	ns	**	
C vs dose 90	<****	*	ns	ns	*	****	ns	ns	ns	ns	****	****	ns	ns	**	
C vs dose 180	<****	**	*	ns	ns	****	ns	**	ns	**	<****	****	ns	ns	**	

ST = superfosfato triplo, FNR = fosfato natural reativo, CV% = coeficiente de variação, Trat = tratamento. Frações P-res = P extraído pela resina, Pi-bic e Po-bic = P inorgânico e orgânico extraídos pelo NaHCO_3 , Pi-hid 0.1 e Po-hid 0.1 = P inorgânico e orgânico extraído pelo NaOH 0,1, P-HCl = P extraído pelo HCl, Pi-hid 0.5 e Po-hid 0.5 = P inorgânico e orgânico extraído pelo NaOH 0,5, P-resid = P residual. P total = soma de todas as frações; P lábil = P-res + Pi-bic + Po-bic; P Moderadamente lábil = Pi-hid 0.1 + Po-hid 0.1 + P-HCl; P-Não lábil = Pi-hid 0.5 + Po-hid 0.5 + P-resid. P inorgânico = P-res + Pi-bic + Pi-hid 0.1 + P-HCl + Pi-hid 0.5 + P-resid. P orgânico = Po-bic + Po-hid 0.1 + Po-hid 0.5. ****, * e ns significativo a 0,1, 1% e não significativo, respectivamente.

A análise de variância indicou que houve interação entre os fatores torta de filtro e dose para o P-moderadamente lábil, mas nas comparações das médias pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$) não foram observadas nenhuma diferença (Figura 48). A interação entre fonte x dose existiu para as frações P-resina e P-HCl (Tabela 23). O P-resina aumentou com a elevação da dose para o ST, alcançando valores de 16,1 e 29,8 mg de P kg⁻¹ de solo nas doses de 90 e 180, respectivamente. O FNR não alterou o P-resina do solo com o aumento da dose de P aplicada (Figura 49).

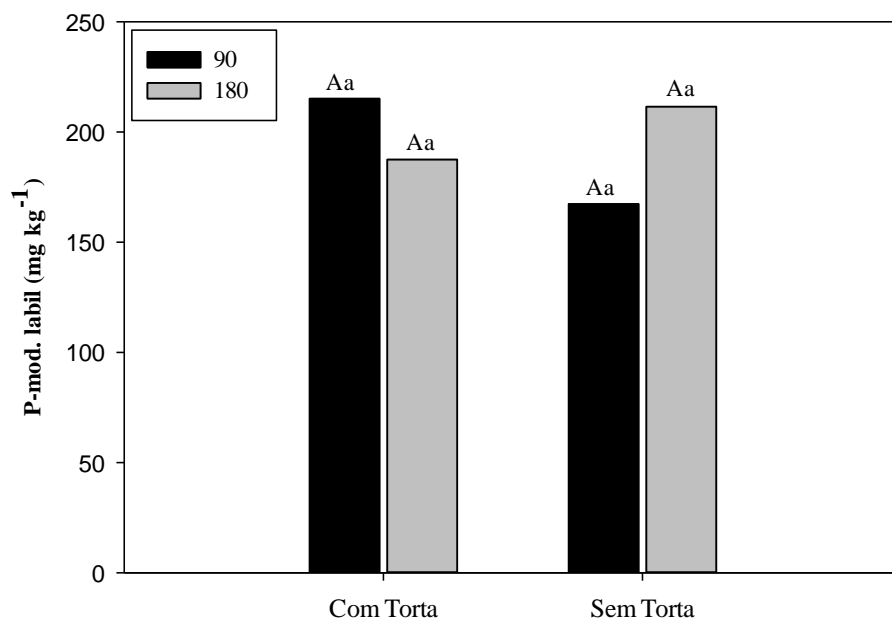


Figura 48. Desdobramento da interação dupla do P-moderadamente lábil do solo (0-20 cm) cultivado com cana-de-açúcar em doses de fósforo na presença e ausência de 10 t ha⁻¹ de torta de filtro, Macatuba, 2015. Letras minúsculas compara as doses na presença ou na ausência de torta e maiúsculas comparam cada dose na presença e na ausência de torta pelo teste de Tuhey ($p < 0,05$).

A aplicação da dose de 180 kg ha⁻¹ de P₂O₅, na forma de ST, elevou o P-resina em cerca de duas vezes que quando aplicada como FNR. Na dose de 90 kg ha⁻¹ de P₂O₅, o P-resina não foi alterado pelas fontes (Figura 49).

As diferenças refletem o grau de solubilidade das fontes e mostram que, embora o solo possua uma alta capacidade de sorção de P, as fontes conseguiram manter boas concentrações de P-lábil para ser absorvido pela cana um ano após a sua aplicação, o que corrobora com o observado por Araújo e Salcedo (1997) aos dezoito meses após a adição de fertilizantes fosfatados em solos cultivados com cana-de-açúcar na região Nordeste.

A fração P-HCl, como já observado, não foi alterada pela fonte solúvel, mesmo com o aumento das doses de P aplicadas ao solo. De forma inversa, a fonte reativa aumenta essa fração com o aumento da quantidade de P aplicada e supera a fonte solúvel independente da taxa de aplicação (Figura 50).

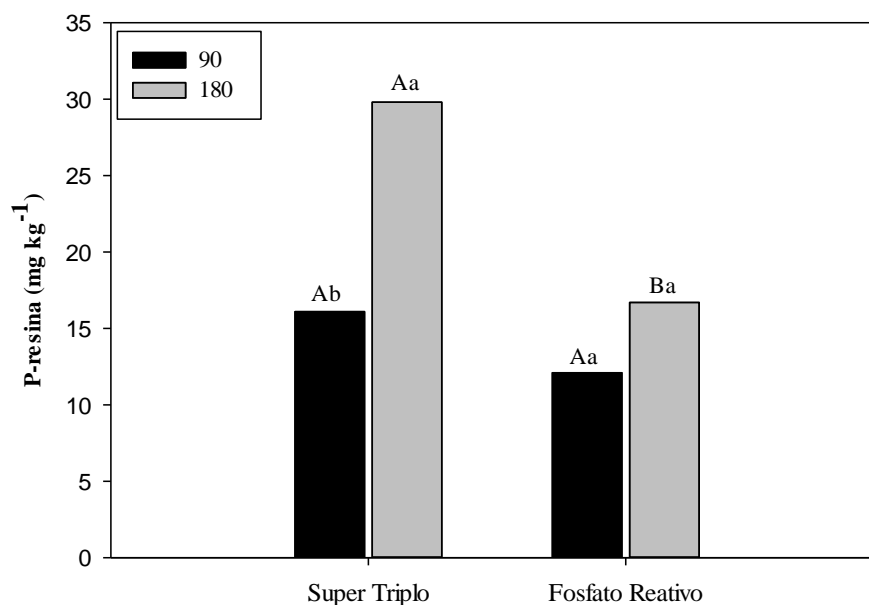


Figura 49. Desdobramento da interação dupla da fração P-resina do solo (0-20 cm) cultivado com cana-de-açúcar em fontes e doses de fósforo, Macatuba, 2015. Letras minúsculas compara as doses em cada fonte de P e maiúsculas comparam cada dose nas duas fontes pelo teste de Tuhey ($p < 0,05$).

Essa constatação deve ter sido influenciada pelo legacy P ou P residual decorrentes das sequências de fertilização a cada renovação do canavial, saturando grande parte dos sítios de alta adsorção desse solo (RODRIGUES et al., 2016; ROWE et al., 2016).

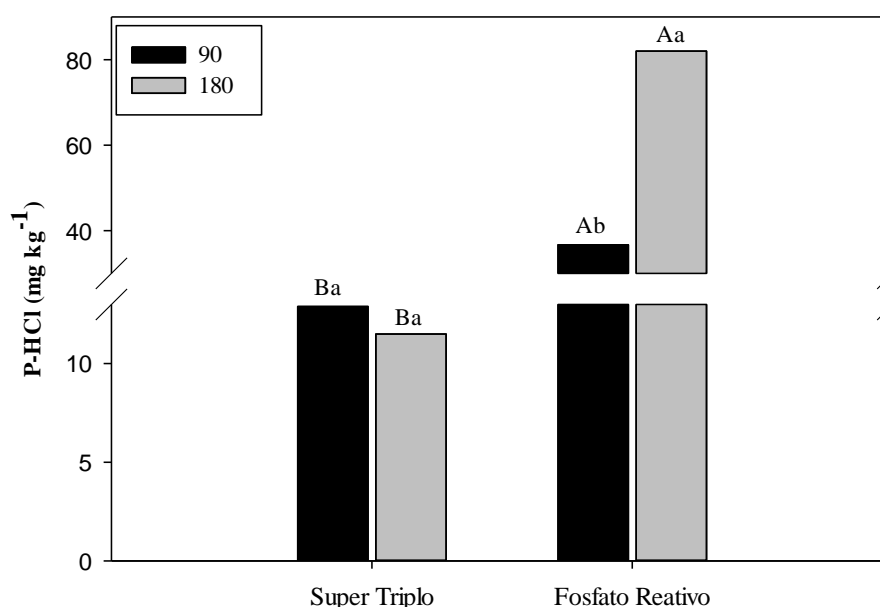


Figura 50. Desdobramento da interação dupla da fração P-HCl do solo (0-20 cm) cultivado com cana-de-açúcar em fontes e doses de fósforo, Macatuba, 2015. Letras minúsculas compara as doses em cada fonte de P e maiúsculas comparam cada dose nas duas fontes pelo teste de Tuhey ($p < 0,05$).

Analisando-se os dados apresentados na tabela 23, nota-se que os incrementos no P-total do solo, a partir da adição dos fertilizantes orgânicos e inorgânicos, se deu

principalmente nas frações que compõem o P-lábil e o P-moderadamente lábil. Não houve alteração no P-não lábil, já o P-inorgânico elevou-se em pouco mais de 10%. Enquanto que o P-orgânico aumentou em torno 40%, impulsionado principalmente pela fração Po-hid0.1.

A pequena alteração ocorrida pela adição de 180 kg ha^{-1} como fertilizante inorgânico, cerca de 590 kg ha^{-1} de P_2O_5 da fonte orgânica nas frações mais estáveis ou no P-não lábil do solo, parece indicar que os solos não possuem uma capacidade infinita de retenção do P adicionado em frações estáveis. E ainda, quando estes atingem a sua capacidade de retenção do P adicionado em tais formas, o P adicionalmente retido terá uma menor energia de ligação, causando um aumento na proporção de P em frações mais lábeis (KASHEM et al., 2004).

Na camada de 20-40 cm, a torta de filtro afetou de forma isolada as frações Pi-bic e Po-hid0.5 (Tabela 24). Houve aumento da fração Pi-bic com a aplicação de torta de filtro. O inverso ocorreu para o Po-hid0.5, diminuindo de $162,7 \text{ mg kg}^{-1}$ sem torta para $128,7 \text{ mg kg}^{-1}$ quando se aplicou torta. O fator fonte influenciou apenas a fração Po-hid0.1, a qual foi aumentada de $62,2 \text{ mg kg}^{-1}$ no FNR para $79,5 \text{ mg de P kg}^{-1}$ na presença do ST. O fator dose foi quem mais afetou as frações de P do solo da camada 20-40 cm, no experimento de Macatuba, tanto de forma isolada quanto em interação com os fatores torta de filtro e fontes de P (Tabela 24).

As doses de P afetaram as frações P-resina, Pi-bic, Po-hid0.1 e o P-moderadamente lábil. Observou-se aumento nos teores dessas frações com a elevação da dose de 90 para 180 kg ha^{-1} de P_2O_5 (Tabela 24).

Houve interação dos fatores torta x fonte para a fração P-HCl. A adição de torta de filtro não alterou essa fração de P do solo. Na ausência da mesma, a fração ácida P-HCl foi aumentada em 2,8 vezes pela fonte reativa, partindo de $10,9 \text{ mg kg}^{-1}$ no ST para $30,8 \text{ mg kg}^{-1}$ no FNR (Figura 51).

A interação torta x dose foi observada para as frações Po-bic, P-HCl, Pi-hid0.5 e para o P-lábil (Tabela 24). Na comparação múltipla pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$) não foram observadas diferenças entre as médias para as frações Po-bic e P-HCl (Figura 52 A e 52 B). A fração Pi-hid0.5 não foi afetada pelas doses de P aplicadas na presença de torta de filtro (Figura 53 A). Na ausência da fonte orgânica registrou-se uma diminuição nos teores dessa fração, de 59 para 49 mg kg^{-1} , quando a dose aplicada foi elevada de 90 para 180 kg ha^{-1} de P_2O_5 (Figura 53 A). A comparação de cada dose na presença e ausência de torta não afetou a fração Pi-hid0.5 do solo (Figura 53 A).

Tabela 24. Médias de frações de fósforo (mg kg^{-1}), teste F e contraste de amostras de solo da camada 20-40 cm cultivado com cana-de-açúcar em fontes e doses de fósforo associadas com torta de filtro, Macatuba, 2015.

Tratamento	P-res	Pi-bic	Po-bic	Pi-hid 0.1	Po-hid 0.1	P-HCl	Pi-hid 0.5	Po-hid 0.5	P-resid	P total	P-lábil	P Mod lábil	P-Não lábil	P inorg	P org	
----- mg kg^{-1} -----																
Controle (C)	2,9	2,7	26,3	21,7	104,3	16,0	45,9	86,1	350	656	32,0	142,3	482,0	439,3	217,0	
Controle torta	8,6	5,8	22,4	28,2	79,1	12,3	61,0	68,9	264	550	36,7	119,3	393,0	379,3	170,3	
Torta (T)	Com	12,5	6,9a	25,4	33,3	71,8	24,0	55,4	128,7b	313	667	40,4	128,9	497,3	445,1	221,7
	Sem	11,4	5,9b	32,3	30,9	70,0	20,9	54,2	162,7a	321	704	44,3	121,8	537,8	444,2	259,5
Fonte (F)	ST	16,2	7,7	30,5	34,8	79,5a	12,3	54,2	155,0	319	706	51,8	126,6	527,8	443,8	262,5
	FNR	7,7	5,1	26,8	29,4	62,2b	32,6	55,3	136,5	315	664	32,9	124,1	507,3	445,4	218,7
Dose (D)	90	8,0b	4,5b	25,8	32,6	61,5b	14,2	57,1	158,7	312	670	33,9	108,3b	527,7	428,3	241,8
	180	15,9a	8,3a	31,9	31,6	80,2a	30,6	52,5	132,7	322	701	50,8	142,4a	507,3	461,0	239,4
Efeito	Teste F															
T	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	
F	ns	ns	ns	ns	*	**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	
D	*	*	ns	ns	*	ns	ns	ns	*	ns	**	**	ns	**	ns	
TxF	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	
TxD	ns	ns	*	ns	ns	**	*	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	
FxD	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**	ns	**	ns	ns	ns	ns	**	ns	
TxFxD	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	
CV%	26	36	5	24	23	26	10	29	3	14	24	25	17	5	38	
Contrastes																
C vs C Torta	*	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	*	
C vs Trat	<***	ns	ns	*	**	ns	*	**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	
C vs Trat Com	<***	ns	ns	*	**	ns	*	*	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	
C vs Trat Sem	<***	ns	ns	ns	**	ns	*	**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	
C vs ST	<***	ns	ns	*	*	*	*	**	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	
C vs FNR	<***	ns	ns	ns	***	*	*	**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	
C vs dose 90	***	ns	ns	*	***	ns	**	**	*	ns	ns	**	ns	ns	ns	
C vs dose 180	<***	ns	ns	ns	*	ns	ns	**	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	

ST = superfosfato triplo, FNR = fosfato natural reativo, CV% = coeficiente de variação, Trat = tratamento. Frações P-res = P extraído pela resina, Pi-bic e Po-bic = P inorgânico e orgânico extraídos pelo NaHCO_3 , Pi-hid 0.1 e Po-hid 0.1 = P inorgânico e orgânico extraído pelo NaOH 0,1, P-HCl = P extraído pelo HCl, Pi-hid 0.5 e Po-hid 0.5 = P inorgânico e orgânico extraído pelo NaOH 0,5, P-resid = P residual. P total = soma de todas as frações; P lábil = P-res + Pi-bic + Po-bic; P Moderadamente lábil = Pi-hid 0.1 + Po-hid 0.1 + P-HCl; P-Não lábil = Pi-hid 0.5 + Po-hid 0.5 + P-resid. P inorgânico = P-res + Pi-bic + Pi-hid 0.1 + P-HCl + Pi-hid 0.5 + P-resid. P orgânico = Po-bic + Po-hid 0.1 + Po-hid 0.5. ***, * e ns significativo a 0,1, 1% e não significativo, respectivamente.

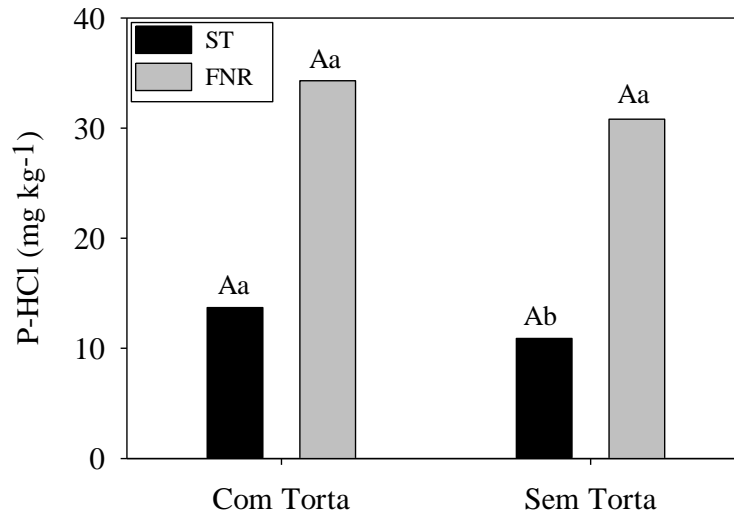


Figura 51. Desdobramento da interação dupla da fração P-HCl do solo (20-40 cm) cultivado com cana-de-açúcar em fontes de fósforo na presença e ausência de 10 t ha⁻¹ de torta de filtro, Macatuba, 2015. Letras minúsculas compara as fontes na presença ou ausência de torta e maiúsculas comparam cada fonte na presença e ausência de torta pelo teste de Tuhey ($p < 0,05$).

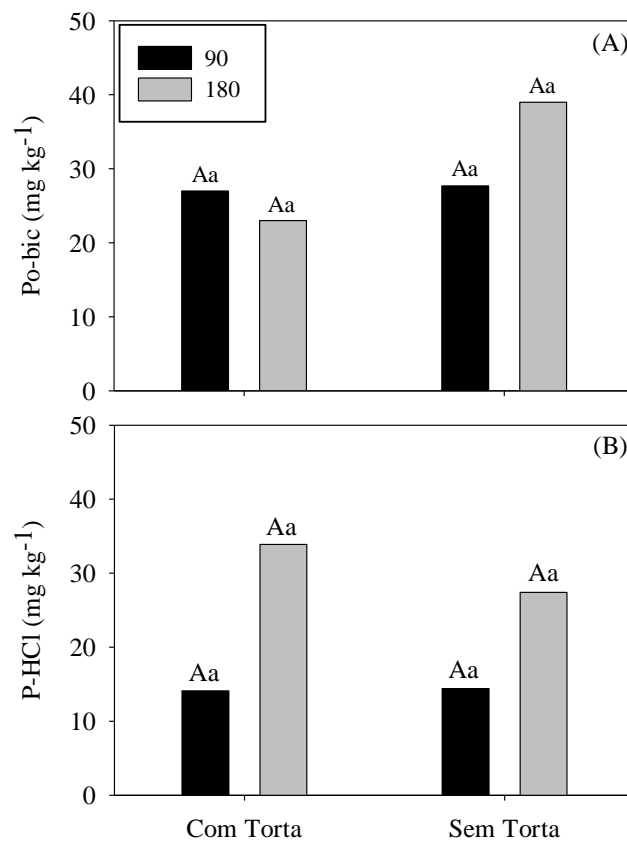


Figura 52. Desdobramento da interação dupla das frações Po-bic e P-HCl do solo (20-40 cm) cultivado com cana-de-açúcar em doses de fósforo na presença e ausência de 10 t ha⁻¹ de torta de filtro, Macatuba, 2015. Po-bic (A) e P-HCl (B). Letras minúsculas compara as doses na presença ou na ausência de torta e maiúsculas comparam cada dose na presença e na ausência de torta pelo teste de Tuhey ($p < 0,05$).

Não houve alteração do P-lábil do solo pelas doses em associação com a fonte orgânica de P (Figura 53 B). De maneira inversa ao comportamento da fração Pi-hid0.5, na

ausência de torta de filtro, o P-lábil foi duplicado com a duplicação da dose de P aplicada ao solo, aumentando de 29,5 mg kg⁻¹ na dose de 90 para 59 mg kg⁻¹ na dose de 180 kg ha⁻¹ de P₂O₅ (Figura 53 B).

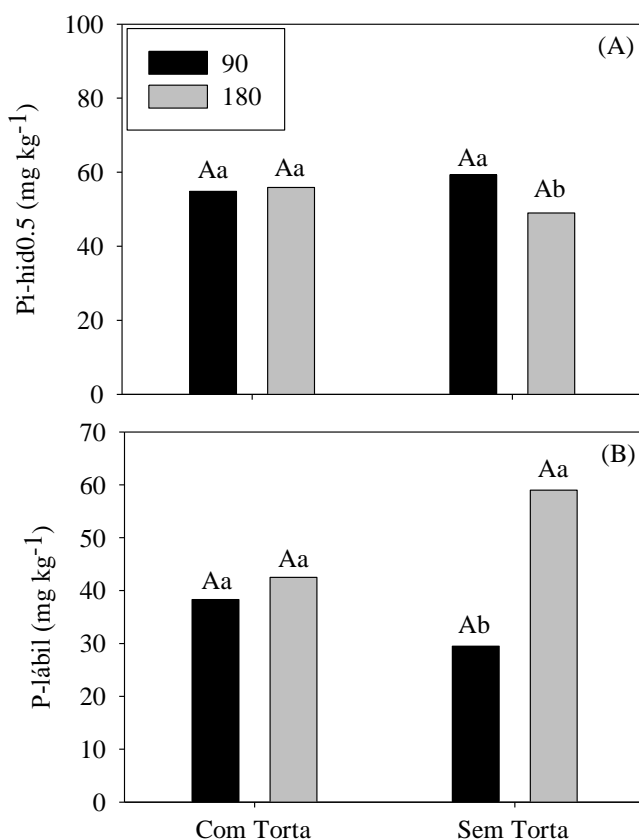


Figura 53. Desdobramento da interação dupla da fração Pi-hid0.5 e P-lábil do solo (20-40 cm) cultivado com cana-de-açúcar em doses de fósforo na presença e ausência de 10 t ha⁻¹ de torta de filtro, Macatuba, 2015. Pi-hid0.5 (A) e P-lábil (B). Letras minúsculas compara as doses na presença ou na ausência de torta e maiúsculas comparam cada dose na presença e na ausência de torta pelo teste de Tuhey ($p < 0,05$).

A interação fonte x dose foi observada para as frações Pi-hid0.5, P-residual e para o P-inorgânico (Tabela 24). A fração Pi-hid0.5 não foi alterada pelas taxas de aplicação de P quando a fonte foi o fosfato reativo. Essa fração diminuiu com o aumento da dose de P aplicada para a fonte solúvel, saindo de 60 mg kg⁻¹ na dose de 90 para 48 mg kg⁻¹ de solo para a dose de 180 kg ha⁻¹ de P₂O₅ (Figura 54 A).

O P-residual do solo não foi alterado pelas doses com o uso do ST (Figura 54 B). Esse compartimento de P foi alterado pelo FNR com o aumento da taxa aplicada. Fixando-se o fator dose para avaliar o efeito da fonte de P utilizada em cada dose, verificou-se aumento do P-residual para o ST na dose de 90 kg ha⁻¹ de P₂O₅ em comparação com o FNR (Figura 54 B).

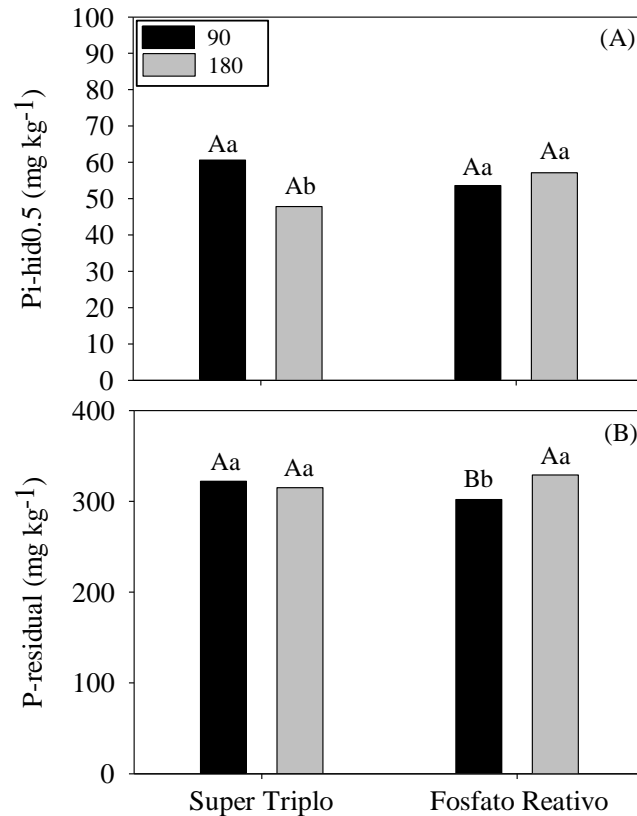


Figura 54. Desdobramento da interação dupla das frações Pi-hid0.5 e P-residual do solo (20-40 cm) cultivado com cana-de-açúcar em fontes e doses de fósforo, Macatuba, 2015. Pi-hid0.1 (A) e P-residual (B). Letras minúsculas compara as doses em cada fonte de P e maiúsculas comparam cada dose nas duas fontes pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

O P-inorgânico do solo não foi alterado pelas doses de P quando a fonte adotada foi ST. Essa forma de P foi alterada pelas doses na fonte reativa, acompanhando a elevação da dose de 90 para 180 kg ha⁻¹ de P₂O₅ (Figura 55). A interação fonte x dose mostrou que somente na dose de 90 kg ha⁻¹ de P₂O₅ o ST aumentou o P-inorgânico do solo em relação ao FNR. Os teores foram de 446 mg kg⁻¹ na fonte solúvel e de 411 mg kg⁻¹ na fonte reativa (Figura 55).

A adição de fertilizantes fosfatados ao solo alteram as frações inorgânicas do solo e aumenta significativamente o P-lábil e o P-moderadamente lábeis com o aumento da dose aplicada, mas as quantidades declinam com o tempo de contato com o solo em função das reações de precipitação e/ou adsorção (OCHWOH; CLAASSENS; DE JAGER, 2005).

Essas reações são mais intensas em solos argilosos, com alta superfície de área, alto conteúdo de carbono orgânico e predomínio de argilas 1:1 e óxidos de Fe e Al na sua mineralogia, como é o solo de Macatuba. Admite-se que tais reações ocorrem em duas fases, uma rápida, em horas ou dias, e uma fase lenta que pode levar de semanas a anos e devem progredir para a difusão ou penetração dentro dos cristais dos minerais do solo (PARFITT, 1989; BARROW, 2015).

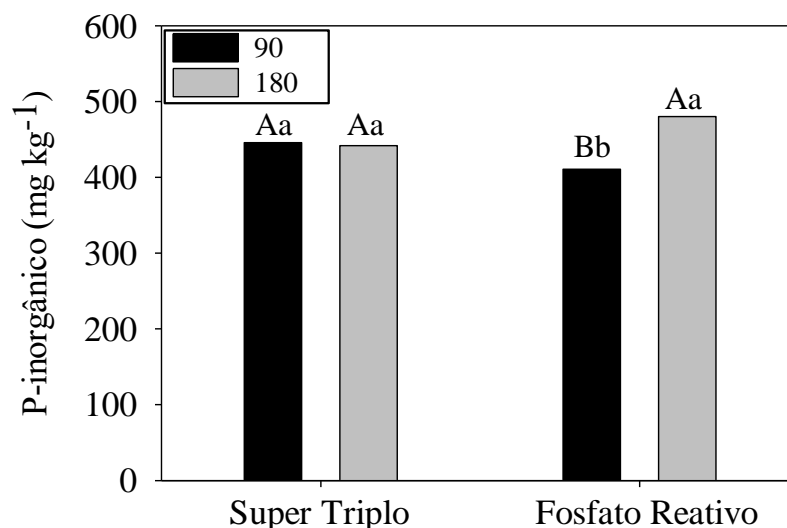


Figura 55. Desdobramento da interação dupla do P-inorgânico do solo (20-40 cm) cultivado com cana-de-açúcar em fontes e doses de fósforo, Macatuba, 2015. Letras minúsculas compara as doses em cada fonte de P e maiúsculas comparam cada dose nas duas fontes pelo teste de Tuhey ($p < 0,05$).

3.4 Considerações finais / Conclusões

A aplicação de torta de filtro aumentou o rendimento de ATR, TPH e a produtividade de colmos industrializáveis, no ciclo de cana planta na área de expansão e não teve influência na área estabelecida com cana.

A torta de filtro aumentou a eficiência agrônômica e a recuperação do P aplicado para a fonte reativa no ciclo de cana planta na área de expansão.

Os tratamentos exerceram pouca influência no rendimento da cana e nas frações de P do solo na área estabelecida e foram suficientes para altas produtividades.

As frações P-resina, Pi-bic e Pi-hid0.1 foram mais alteradas pelo ST na presença de torta e geralmente acompanharam o aumento da dose e o P-HCl foi alterado pelo FNR e aumentou com a dose na presença da torta na área de expansão e teve pouca influência na área estabelecida.

A associação da torta de filtro com a fonte reativa pode ser uma boa opção de manejo em função da torta melhorar sua eficiência no primeiro ano de aplicação e pelo seu importante efeito residual ao longo dos ciclos da cana.

O acompanhamento das avaliações por mais ciclos de cultivos é essencial para a obtenção de mais informações sobre o efeito do manejo integrado das fontes de fósforo com a torta de filtro nas formas de P do solo e na produtividade da cultura nas áreas estudadas.

Referências

ALMEIDA, D.S.; ROSOLEM, C.A. Ruzigrass grown in rotation with soybean increases soil labile phosphorus. **Agronomy Journal**, Madison, v.108, n.6, p.1-9, 2016.

ARAÚJO, M.S.B.; SALCEDO, I.H. Formas preferenciais de acumulação de fósforo em solos cultivados com cana-deaçúcar na região Nordeste. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.21, n.4, p.643-650, 1997.

BARROW, N.J. Soil phosphate chemistry and the P-sparing effect of previous phosphate applications. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 397, p.401-409, 2015.

BARROW, N.J.; BOLLAND, M. D. A.; ALLEN, D. G. Effect of previous additions of superphosphate on sorption of phosphate. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v.36, n.3, p.359-372, 1998.

BARROW, N.J.; BOLLAND, M.D.A. A comparison of methods for measuring the effect of level of application on the relative effectiveness of two fertilizers. **Fertilizer Research**, Dordrecht, v.26, n.1-3, p.1-10, 1990.

BATJES, NH. **Global distribution of soil phosphorus retention potential**. ISRIC - World Soil Information, Wageningen, ISRIC Report 2011/06, 2011. 42p.

BOKHTIAR, S.M.; SAKURAI, K. Effect of application of inorganic and organic fertilizers on growth, yield and quality of sugarcane. **Sugar Tech**, New Delhi, v.7, n.7, p.33-37, 2005.

BOX, G.E.P.; COX, D.R. An analysis of transformations, **Journal of the Royal Statistical Society**, London, Series B, v.26, n.2, p.211-252, 1964.

BROOKES, P.C.; POWLSON, D.S. & JEKILSON, D.S. Measurement of microbial biomass phosphorus in soil. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v.14, p.319-329, 1982.

CAIONE, G.; PRADO, R.M.; CAMPOS, C.N.S. MODA, L.R.; VASCONCELOS, R.L.; PIZAURO JÚNIOR, J.M Response of sugarcane in a red ultisol to phosphorus rates, phosphorus sources, and filter cake. **The Scientific World Journal**, Cairo, v.2015, Article ID 405970, 10 p. 2015. doi:10.1155/2015/405970. <http://dx.doi.org/10.1155/2015/405970>

CHIEN, S.H.; MENON, R.G. Factors affecting the agronomic effectiveness of phosphate rock for direct application. **Fertilizer Research**, Dordrecht, v.41, n.3, p.227-234, 1995.

CHIEN, S.H.; PROCHNOW, L.I.; TU, S.; SNYDER, C.S. Agronomic and environmental aspects of phosphate fertilizers varying in source and solubility: an update review. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v.89, p.229-255, 2011.

CHIEN, S.H.; SIKORA, F.J.; GILKES, R.J.; MCLAUGHLIN, M. J. Comparing of the difference and balance methods to calculate percent recovery of fertilizer phosphorus applied to soils: a critical discussion. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v.92, n.1, p.1-8, 2012.

CONDRON, L.M.; GOH, K.M.; NEWMAN, R.H. Nature and distribution of soil phosphorus as revealed by a sequential extraction method followed by ^{31}P nuclear magnetic resonance analysis. **Journal of Soil Science**, Oxford, v.36, p.199-207, 1985.

CONSECANA – Conselho dos Produtores de Cana-de-Açúcar, Açúcar e Álcool do Estado de São Paulo. **Manual de instruções**. 5.ed. Piracicaba, 2006. 111p.

CONTE, E.; ANGHINONI, I.; RHEINHEIMER, D.S. Frações de fósforo acumuladas em latossolo argiloso pela aplicação de fosfato no sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência Solo**, Viçosa, v.27, p.893-900, 2003.

CORTEZ, L.; MAGALHAES, P.; HAPPI, J. Principais subprodutos da agroindústria canavieira e sua valorização. **Revista Brasileira de Energia**, Itajubá, v.2, n.2, p.1-17, 1992.

CROSS, A.F.; SCHLESINGER, W.H. A literature review and evaluation of the Hedley fractionation: applications to the biogeochemical cycle of soil phosphorus in natural ecosystem. **Geoderma**, Amsterdam, v.64, p.197-214, 1995.

DAMON, P.M.; BOWDEN, B.; ROSE, T.; RENGEL, Z. Crop residue contributions to phosphorus pools in agricultural soils: A review. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v.74, p.127-137, 2014.

DEE, B.M.; HAYNES, R.J.; GRAHAM, M.H. Changes in soil acidity and the size and activity of the microbial biomass in response to the addition of sugar mill wastes. **Biology and Fertility Soils**, New York, v.37, p. 47-54, 2003.

DICK, W. A.; TABATABAI, M. A. Determination of orthophosphate in aqueous solutions containing labile organic and inorganic phosphorus compounds. **Journal Environmental Quality**, Madison, v. 6, n.1, p.82-85, 1977.

DOBERMANN, A.; GEORGE, T.; THEVS, N. Phosphorus fertilizer effects on soil phosphorus pools in acid upland soils. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.66, n.2, p.652-660, 2002.

DOTANIYA, M.L.; DATTA, S.C.; BISWAS, D.R.; DOTANIYA, C.K.; MEENA, B.L.; RAJENDIRAN, S.; REGAR, K.L.; LATA, M. Use of sugarcane industrial by-products for improving sugarcane productivity and soil health. **International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture**, New York, v.5, n.3, p.185-194, 2016.

ELSAYED, M.T.; BABIKER, M.H.; ABDELMALIK, M.E.; MUKHTAR, O.N.; MONTANGE, D. Impact of filter mud applications on the germination of sugarcane and small-seeded plants and on soil and sugarcane nitrogen contents. **Bioresource Technology**, v.99, n.10, p.4164-4168, 2008.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema Brasileiro de Classificação do solo**. 3.ed.. Brasília: EMBRAPA, 2013. 353p.

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C.; LI, Y. C. The role of nutrient efficient plants in improving crop yields in the twenty first century. **Journal of Plant Nutrition**, London, v.31, n.6, p.1121-1157, 2008.

FRAVET, P.R.F.; SOARES, R.A.B.; LANA, R.M.Q.; LANA, A.M.Q.; KORNDÖRFER, G.H. Efeito de doses de torta de filtro e modo de aplicação sobre a produtividade e qualidade tecnológica da soqueira de cana-de-açúcar. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.34, n.3, p. 618-624, 2010.

GHOSAL, P.K.; CHAKRABORTY, T.; BHATTACHARYA, B.; BAGCHI, D.K. Relative agronomic effectiveness of phosphate rocks and P adsorption characteristics of an Oxic Rhodustalf in Eastern India. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Rostock, v. 166, p.750-755, 2003.

GIKONYO, E.W.; ZAHARAH, A.R.; HANAFI, M.M. Extractable Bray-1 phosphorus and crop yields as influenced by addition of phosphatic fertilizers of various solubilities integrated with manure in an acid soil. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v.88, n.1, p.79-90, 2010.

GILBERT, R.A.; MORRIS, D.R.; RAINBOLT, C.R.; MCCRAY, J.M.; PERDOMO, R.E.; EILAND, B.; POWELL, G.; MONTES, G. Sugarcane response to mill mud, fertilizer, and soybean nutrient sources on a sandy soil. **Agronomy Journal**, Madison, v.100, n.3, p.845-854, 2008.

GOH, K.M.; CONDRON, L. M. Plant availability of phosphorus accumulated from long-term applications of superphosphate and effluent to irrigated pastures. **New Zealand Journal of Agricultural Research**, London, v.32, p.45-51, 1989.

HE, Z.L.; YANG, X.; YUAN, K.N.; ZHU, Z.X. Desorption and plant-availability of phosphate sorbed by some importante minerals. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.162, p.89-97, 1994.

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

KASHEM, MD.A.; AKINREMI, O.O.; RACZ, G.J. Phosphorus fractions in soil amended with organic and inorganic phosphorus sources. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v.84, n.1, p.83-90, 2004.

KHASAWNEH, F.E.; DOLL, E.C. The use of phosphate rock for direct application to soils. **Advances in Agronomy**, San Diego, v 30, p.159-206, 1978.

LIMA FILHO, S.A., ZAMBELLO JÚNIOR, E., ORLANDO FILHO, J. Doses e fontes de fósforo em cana-planta no Estado de São Paulo. **Saccharum**, São Paulo, v.5, n.21, p.37-43, 1982.

MACDONALD, G.K.; BENNETT, E.M.; POTTER, P.A.; RAMANKUTTY, N. Agronomic phosphorus imbalances across the world's croplands. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, Washington, PNAS, v.108, n.7, p.3086-3091, 2011.

MURPHY, J.; RILEY, J.P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. **Analytica Chimica Acta**, Oxford, v.27, n.1, p.31-36, 1962.

OCHWOH, V.A.; CLAASSENS, A.S.; DE JAGER, P.C. Chemical changes of applied and native phosphorus during incubation and distribution into different soil phosphorus pools. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Philadelphia, v.36, n.4-6, p.535-556, 2005.

OMOLLO, J.O.; ABAYO, G.O. Effect of phosphorus sources and rates on sugarcane yield and quality in Kibos, nyando sugar zone. In: BATIONO, A.; WASWA, B.; OKEYO, J.M.; MAINA, F.; KIHARA, J.(Eds.). *Innovations as key to the green revolution in Africa: exploring the scientific facts*. Dordrecht: Springer, 2011. p.533-537.

PAUL, G.C.; MANNAN, M.A. An integrated nutrient management approach to improve sugar productivity, **Sugar Tech**, New Delhi, v.9, n.1, p.28-35, 2007.

PARFITT, R.L. Phosphate reactions with natural allophane, ferrihydrite and goethite. **Journal of Soil Science**, Oxford, v.40, p.359-369, 1989.

PRADO, R.M.; CAIONE, G.; CAMPOS, C.N.S. filter cake and vinasse as fertilizers contributing to conservation agriculture. **Applied and Environmental Soil Science**, Cairo, v.2013, Article ID 581984, 8p., 2013. doi:10.1155/2013/581984. <http://dx.doi.org/10.1155/2013/581984>

PRASAD, M. Response of sugarcane to filter press mud and N, P, and K fertilizers. I. effect on sugarcane yield and sucrose content. **Agronomy Journal**, Madison, v.68, n.4, p.539-543, 1976.

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. Campinas: IAC, 1997. 285p. (Boletim técnico n° 100)

RAMESH, P.; MAHADEVASWAMY, M. Effect of formative phase drought on different classes of shoots, shoot mortality, cane attributes, yield and quality of four sugarcane cultivars. **Journal of Agronomy and Crop Science**, Berlin, v.185, n.4, p.249-258, 2000.

REIN, T.A.; SOUSA, D.M.G. Sugarcane response to phosphorus sources and placement in a very clayey oxisol of the Brazilian Cerrado. **Proceedings International Society Sugar Cane Technologists**, Vera Cruz, v.28, p.1-9, 2013.

RHEINHEIMER, D.S.; ANGHINONI, I. Distribuição do fósforo inorgânico em sistemas de manejo de solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.36, n.1, p.151-160, 2001.

RICHARDS, J.E. Chemical characterization of plant tissue. In: CARTER, M.R. (Ed.). **Soil sampling and methods of analysis**. Canadian Society of Soil Science: 1993. p.115-139.

ROBINSON, J.S.; SYERS, J.K. A critical evaluation of the factors influencing the dissolution of gafsa phosphate rock. **Journal of Soil Science**, Oxford, v.41, p.597-605, 1990.

RODELLA, A.A.; SILVA, L.C.F.; ORLANDO FILHO, J. Effects of filter cake application on sugarcane yields, **Turrialba**, Cartago, v.40, n.3, p.323-326, 1990.

RODRIGUES, M.; PAVINATO, P.S.; WITHERS, P.J.A.; TELES, A.P.B.; HERRERA, W.F.B. Legacy phosphorus and no tillage agriculture in tropical oxisols of the Brazilian savana. *Science of The Total Environment*, Amsterdam, v.542, p.1050-1061, 2016.

ROWE, H. et al. Integrating legacy soil phosphorus into sustainable nutrient management strategies for future food, bioenergy and water security. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v.104, p. 393-412, 2016.

SAGOE, C.I.; ANDO, T.; KOUNO, K.; NAGAOKA, T. Relative importance of protons and solution calcium concentration in phosphate rock dissolution by organic acids. **Soil Science and Plant Nutrition**, London, v.44, n.4, p.617-625, 1998.

SANYAL, S.K.; DE DATTA, SK. Chemistry of phosphorus transformations in soil. **Advances in Soil Science**, New York, v.16, p.1-120, 1991.

SAS Institute Incorporation. **The SAS system for Windows, versão 9.3**, Cary, 2010.

SATO, A.M.; CATUCHI, T.A.; RIBEIRO, R.V.; SOUZA, G.M. The use of network analysis to uncover homeostatic responses of a drought-tolerant sugarcane cultivar under severe water deficit and phosphorus supply. **Acta Physiologiae Plantarum**, New York, v.32, n.6, p.1145-1151, 2010.

SAVINI, I.; KIHARA, J.; KOALA, S.; MUKALAMA, J.; WASWA, B.; BATIONO, A. Long-term effects of TSP and Minjingu phosphate rock applications on yield response of maize and soybean in a humid tropical maize-legume cropping system. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v.104, n.1., p.79-91, 2016.

SIBANDA, H.M.; YOUNG, S.D. Competitive adsorption of humus acids and phosphate on goethite, gibbsite and two tropical soils. **Journal of Soil Science**, Oxford, v.37, p.197-204, 1986.

SIMMONDS, B.; MCDOWELL, R.W.; CONDRON, L.M.; COX, N. Can phosphorus fertilizers sparingly soluble in water decrease phosphorus leaching loss from an acid peat soil? **Soil Use and Management**, Hoboken, v.32, n.3, p.322-328, 2016

SINGH, J.; BRAR, B.S.;SEKHON, B.S.; MAVI, M.S.; SINGH, G.; KAUR, G. Impact of long-term phosphorous fertilization on Olsen-P and grain yields in maize–wheat cropping sequence. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v.106, n.2, p.157-168, 2016.

SINGH, K.P.; SUMAN, A.; SINGH, P.N.; SRIVASTAVA, T.K. Improving quality of sugarcane-growing soils by organic amendments under subtropical climatic conditions of India. **Biology and Fertility of Soils**, New York, v.44, n.2, p.367-376, 2007.

SOUSA, R.T.X.; KORNDÖRFER, G.H.; SOARES, R.A.B.; FONTOURA, P.R. Phosphate fertilizers for sugarcane used at pre-planting (phosphorus fertilizer application). **Journal of Plant Nutrition**, London, v.38, n.9, p.1444-1455, 2015.

SUNDARA, B. Phosphorus efficiency of sugarcane varieties in a tropical alfisol. **Fertilizer Research**, Dordrecht, v.39, p.83-88, 1994.

TIESSEN, H.; STEWART, J.W.B.; COLE, C.V. Pathways of phosphorus transformations in soils of differing pedogenesis. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 48, p. 853-858, 1984.

USEPA - United States Environmental Protection Agency. **Methods of chemical analysis for water and wastes**. Cincinnati: USEPA, 1971.

WANG, Y.; TANG, J.; ZHANG, H.; SCHRODER, J.L.; HE, Y. Phosphorus availability and sorption as affected by long-term fertilization. **Agronomy Journal**, Madison, v.106, n.5, p.1583-1592, 2014.

WANG, Y.L.; GAO, Z.; WANG, Y.; ZHANG, Y.H.; ZHUANG, X.Y.; ZHANG, H. Phosphorus availability and transformation as affected by repeated phosphorus additions in an Ultisol. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Philadelphia, v.46, p.1922-1933, 2015.

YADUVANSHI, N.P.S; YADAV, D.V.; SINGH, T. Economy in fertilizer nitrogen by its integrated application with sulphitation filter cake on sugarcane. **Biological Wastes**, Amsterdam, v.32, p.75-79, 1990.

ZHENG, Z.; SIMARD, R.R.; LAFOND, J.; PARENT, L.E. Pathways of soil phosphorus transformations after 8 years of cultivation under contrasting cropping practices. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v.66, p.999-1007, 2002.

ANEXOS

Capítulo 2

Anexo 2A. Transformações dos dados de frações de P de solo cultivado com cana-de-açúcar em fontes e doses de fósforo associado com torta de filtro no período 2014 a 2015 no experimento 1.

Frações de P	Agudos 2014			Agudos 2015			Macatuba 2015		
	0-10	10-20	20-40	0-10	10-20	20-40	0-10	10-20	20-40
	Transformações*								
P-res	Log	-0,4	-0,9	NT	NT	Log	NT	0,3	-1
Pi-bic	NT	-0,3	-1	NT	-0,1	-2	0,2	-1,3	-0,7
Po-bic	0,1	NT	NT	-0,2	-0,1	-1	NT	-1	-1
Pi-hid0.1	0,3	Log	NT	Log	Log	-1	Log	-1	-0,6
Po-hid0.1	-0,1	Log	NT	0,1	Log	-1	NT	Log	NT
P-HCl	Log	-0,3	-0,5	Log	-0,8	-0,8	NT	-0,5	log
Pi-hid0.5	NT	NT	-0,3	NT	NT	NT	Log	NT	-1
Po-hid0.5	0,2	0,4	0,1	-0,2	0,3	-2	NT	Log	NT
P-resid	0,5	NT	2	NT	NT	-1	-2	-1	8,4
P total	NT	-1	NT	-2	NT	NT	-1	-1	-1
P-lábil	Log	-0,2	Log	-1	NT	NT	NT	0,2	-1
P mod lábil	0,4	Log	Log	-0,2	NT	Log	NT	-1	-1
P-não lábil	NT	NT	NT	Log	NT	Log	-2	-1	NT
P inorg	Log	Log	NT	Log	NT	Log	-2	-1	-1,6
P org	Log	Log	NT	Log	Log	Log	NT	Log	NT

* números representam transformação em potência, Log = transformação logarítmica e NT = dados não transformados.

Capítulo 3

Anexo 3A. Transformações dos dados de frações de P de solo cultivado com cana-de-açúcar em fontes e doses de fósforo associado com torta de filtro no período 2014 a 2015 no experimento 2.

Frações de P	Agudos 2014			Agudos 2015			Macatuba 2015		
	0-10	10-20	20-40	0-10	10-20	20-40	0-10	10-20	20-40
	Transformações*								
P-res	-1	Log	-0,1	NT	0,6	Log	NT	NT	Log
Pi-bic	Log	Log	-0,1	Log	Log	-1	NT	Log	-1
Po-bic	0,2	NT	NT	0,3	0,5	-1	NT	-1	Log
Pi-hid0.1	NT	-1	-0,1	-1	Log	-1	-1	NT	NT
Po-hid0.1	NT	0,8	-0,3	Log	Log	Log	Log	NT	NT
P-HCl	-0,2	-0,2	-0,1	Log	-0,5	Log	-1	-1	-1
Pi-hid0.5	NT	NT	-0,3	NT	NT	NT	-1	NT	NT
Po-hid0.5	0,5	0,3	0,4	Log	Log	NT	NT	NT	-1
P-resid	Log	-0,2	-1	NT	NT	NT	-1	Log	NT
P total	NT	-1	-0,9	-1	-1	Log	-1	Log	NT
P-lábil	Log	Log	-0,1	Log	Log	Log	NT	Log	NT
P mod lábil	NT	-0,6	-0,5	Log	-0,5	Log	Log	-1	-2
P-não lábil	Log	-1	-1	-1	-0,6	NT	-1	Log	NT
P inorg	Log	Log	Log	-1	-1	-1	-1	Log	-1
P org	Log	NT	-0,5	Log	Log	Log	Log	-1	NT

* números representam transformação em potência, Log = transformação logarítmica e NT = dados não transformados.

Anexo 3C. Médias de massa seca de raiz da cana-de-açúcar adubada com super triplo (ST) e fosfato natural reativo (FNR) aplicados a lanço e no sulco com e sem torta de filtro, Agudos-SP, 2015.

Tratamento	Profundidade (m)					Distância da linha da cana (m)			Total	
	0-0,2	0,-0,4	0,4-0,6	0,6-0,8	0,8-1,0	0-0,3	0,3-0,6	0,6-0,9		
	-----kg ha ⁻¹ -----									
Controle (C)	1140	615	349	172	168	1227	732	483	2443	
Controle torta	699	525	277	151	119	878	465	426	1770	
Torta										
(T)	Com	792	506	315	205	167	1004	600	381	1985
	Sem	769	436	251	165	129	828	543	379	1750
Fonte										
(F)	ST	760	469	270	187	131	903	543	371	1816
	FNR	801	473	297	183	166	930	601	389	1919
Modo										
(M)	Lanço	708	454	293	179	142	882	532b	363	1777b
	Sulco	853	488	273	191	154	950	612a	396	1958a
		Teste F								
T		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
F		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
M		*	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	*
TxF		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
TxM		*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
FxM		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
TxFxM		ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns
CV%		14	16	35	32	29	18	15	17	8
		Contraste								
C vs C Torta		*	ns	ns	ns	ns	*	*	ns	*
C vs Trat		***	*	ns	ns	ns	*	*	ns	<***
C vs Trat Com		***	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	***
C vs Trat Sem		***	*	ns	ns	ns	**	**	ns	<***
C vs ST		***	*	ns	ns	ns	*	**	ns	<***
C vs FNR		**	*	ns	ns	ns	*	ns	ns	<***
C vs lanço		***	*	ns	ns	ns	**	**	ns	<***
C vs sulco		**	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns	***